



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Proposta de metodologia usando regressões lineares no
cálculo dos efeitos vibratórios do rebentamento de
explosivos**

Filipe Alexandre Ferreira da Silva Tavares de Melo



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

**Proposta de metodologia usando regressões lineares no
cálculo dos efeitos vibratórios do rebentamento de
explosivos**

Filipe Alexandre Ferreira da Silva Tavares de Melo

Nº. 1080039

Projecto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente, realizada sob a orientação do Engº António Galiza, Professor Adjunto Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e do Engº António Vieira, Assistente do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.

Júri

Presidente

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenheiro António Carlos Reis Galiza Carneiro

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenheiro António Rodrigues Vieira

Equiparado a Assistente, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre Luís Carlos Correia Ramos

Departamento de Controlo Operacional, MonteAdriano: Agregados, SA

Agradecimentos

Neste ano de muita mudança na minha vida, quero agradecer a todos aqueles que me deram energia e me fizeram acreditar que conseguia chegar até aqui.

Agradeço ao Eng.º Carlos Galiza e ao Eng.º. António Vieira por toda a disponibilidade apresentada, sobretudo nestas últimas semanas.

A todas as empresas que colaboraram e apoiaram a realização deste estudo agradeço os meios que possibilitaram para esta aquisição de dados.

Quero agradecer a todos os amigos que me ajudaram a ultrapassar este desafio, especialmente ao Márcio por toda a ajuda que me deu durante a realização da obra referente ao maciço A. Igualmente quero transmitir o meu obrigado a todos os amigos pela partilha de bibliografia e conhecimento em relação a este tema presente no nosso quotidiano de técnicos de explosivos.

Aos meus pais, irmão e restante família o meu agradecimento por me moldarem com esta personalidade e carácter.

Por último, um agradecimento muito especial à minha mulher por todo o apoio que me deu e por todos os fins-de-semana e noites “sacrificadas” para a realização desta tese.

Palavras-chave

Explosivos, Vibrações, Monitorização, Prevenção, NP 2074

Resumo

Este trabalho apresenta o estudo das leis de propagação das velocidades de vibração resultantes do uso de explosivo em diferentes maciços. Foram efectuados estudos para três tipos de maciços diferentes, granito, quartzito e calcário. Efectuaram-se campanhas de monitorização e registo dos dados em cada uma das situações. Caracterizando e utilizando duas leis de propagação de velocidades no maciço, a de Johnson e Langefors, calculou-se as suas variáveis por método estatístico de regressões lineares múltiplas. Com a obtenção das variáveis fizeram-se estudos de previsão dos valores de vibração a obter utilizando a carga explosiva aplicada nos desmontes. Através dos valores de vibração obtidos em cada pega de fogo para cada tipo de maciço comparou-se quais das duas leis apresentam o valor de velocidade de vibração menor desviado do real. Conforme ficou verificado neste estudo, a equação de Langefors garante uma mais-valia da sua aplicação na previsão das velocidades de vibração pois joga favoravelmente a nível da segurança assim como apresenta um menor desvio face à equação de Johnson quando comparada com o valor real de vibração obtido. Com isto o método de utilização de regressões lineares múltiplas como cálculo dos efeitos vibratórios é extremamente vantajoso a nível de prevenção de danos e cálculo de velocidades de vibração inferiores ao imposto pela Norma.

Keywords

Explosives, Vibrations, Monitoring, Prevention, NP 2074

Abstract

This work presents a study of the propagation of vibration velocity resulting from the use of explosives in different rock masses. Were performed studies for three kinds of rock masses, such as granite, limestone and quartzite. There have been monitoring campaigns and data registry in each situations. Characterizing and using two different laws of propagation of vibration velocity, Johnson and Langefors, was calculated their variables by statistical method of multiple linear regression. After obtaining the variables were made studies to predict the vibration values when using the same explosive charges applied in the rounds. Through this vibration values obtained in each round for each kind of rock mass the two equations were compared with the real value and registered which one had the smaller deviation. As was verified in this study the Johnson equation appears to be better in the prediction of the vibration velocities because it had the small deviation and acts favorably at a security perspective. This method of using multiple linear regressions as calculation of the vibrations effects it's extremely advantageous in a prevention level as well good predictor of vibration velocities smaller that the ones set in the Portuguese Standard.

Índice

1. Introdução e enquadramento do tema	13
2. Objectivo do estudo	19
3. Vibrações.....	23
3.1. Definição	23
3.2. Ondas Sísmicas	24
3.3. Efeitos das cargas explosivas.....	28
3.4. Dinâmica das rochas.....	31
3.5. Atenuação Dinâmica	32
4. Minimização das Vibrações.....	37
4.1. Vibrações em desmontes aquáticos	48
5. Sismógrafos	53
6. Legislação	59
7. Impacto Ambiental.....	65
8. Planeamento do projecto.....	71
9. Lei de propagação sísmica.....	77
9.1. Critérios de Danos	80
9.2. Fórmula de Langefors e Johnson.....	82
10. Monitorização	89
11. Ensaio de Campo	93
11.1. Ensaio Maciço A.....	96
a) Localização	96
b) Geologia	97
c) Estruturas a proteger	97
d) Ensaio.....	98
e) Resultados	99
f) Fórmula de Johnson	99
g) Fórmula de Langefors.....	103
h) Interpretação resultados.....	104
11.2. Ensaio Maciço B.....	107
a) Localização	107
b) Geologia	107

c)	Estruturas a proteger	108
d)	Ensaio.....	109
e)	Resultados	110
f)	Fórmula de Johnson	110
g)	Fórmula de Langefors.....	113
h)	Interpretação resultados.....	114
11.3.	Ensaio Maciço C	117
a)	Localização	117
b)	Geologia.....	118
c)	Estruturas a proteger	118
d)	Ensaio.....	119
e)	Resultados	120
f)	Fórmula de Johnson	121
g)	Fórmula de Langefors.....	123
h)	Interpretação resultados.....	124
11.4.	Resumo dos valores calculados.....	127
12.	Parâmetro frequência	131
13.	Conclusões.....	135
	Referências bibliográficas.....	139

Índice de Figuras

Figura 1 – Emboquilhamento de um projecto de túnel.....	13
Figura 2 – Tipos de ondas sísmicas.....	26
Figura 3 – Fases da detonação de explosivo	28
Figura 4 – Correlação entre os critérios de minimização do custo dos desmontes com os impactes ambientais	30
Figura 5 – Utilização de iniciações múltiplas para redução da carga por retardo	38
Figura 6 – Influência do afastamento na geração de vibrações	38
Figura 7 – Influência da direcção na geração de vibrações	39
Figura 8 – Gráfico da relação entre intervalo de retardo e velocidade de partícula	40
Figura 9 – Curvas de deslocamento da rocha em função do consumo específico	41
Figura 10 – Retardo pequeno entre fiadas	41
Figura 11 – Retardo ideal entre fiadas	42
Figura 12 – Exemplo de um desmonte com os retardos bem seleccionados	42
Figura 13 – Exemplo de um pré-corte	43
Figura 14 – Esquematização da teoria do pré-corte	44
Figura 15 – Importância da inclinação dos furos	46
Figura 16 – Pormenor de um rebentamento subaquático	48
Figura 17 – Sismógrafo Instantel Mimate Blaster	53
Figura 18 – Exemplo de um registo de vibração de um sismógrafo	55
Figura 19 – Classificação da escavabilidade de maciços rochosos	71
Figura 20 – Comparação da resposta humana à vibração mecânica	82
Figura 21 – Exemplo de curvas de isovalores de velocidade	84
Figura 22 – Exemplos da relação carga distância para certos valores de vibração	85
Figura 23 – Fluxograma da metodologia utilizada	95
Figura 24 – Aspecto geral do maciço em ensaio A.....	96
Figura 25 – Zona envolvente à área de intervenção maciço A	97
Figura 26 – Localização dos diferentes pontos de monitorização maciço A.....	98
Figura 27 – Gráfico comparativo entre os valores de velocidade de vibração obtidos e os expectáveis no maciço A	105
Figura 28 – Linhas de tendência em relação aos valores expectáveis e reais maciço A.....	106
Figura 29 – Aspecto geral do maciço em ensaio B.....	107

Figura 30 – Localização dos diferentes pontos de monitorização maciço B.....	108
Figura 31 – Gráfico comparativo entre os valores de velocidade de vibração obtidos e os expectáveis no maciço B	115
Figura 32 – Linhas de tendência em relação aos valores expectáveis e reais maciço B	116
Figura 33 – Aspecto geral do maciço em ensaio C.....	118
Figura 34 – Localização dos diferentes pontos de monitorização maciço C.....	119
Figura 35 – Gráfico comparativo entre os valores de velocidade de vibração obtidos e os expectáveis no maciço C	125
Figura 36 – Linhas de tendência em relação aos valores expectáveis e reais maciço C	126

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Velocidades limite de vibração recomendada nas fundações de edifícios	47
Tabela 2 – Resumo da NP 2074.....	60
Tabela 3 – Classificação de Beiniawski	73
Tabela 4 – Valores Limite de Velocidade Eficaz de vibração na geração de danos	81
Tabela 5 – Coeficientes (a, b e c) característicos de algumas litologias	84
Tabela 6 – Especificações dos explosivos utilizados nos ensaios.....	96
Tabela 7 – Parâmetros médios do plano de fogo maciço A.....	98
Tabela 8 – Valores de velocidade de vibração obtidos maciço A	99
Tabela 9 – Preparação dos dados para a análise de regressão linear no estudo maciço A.....	101
Tabela 10 – Sumário dos resultados obtidos do cálculo da regressão múltipla linear e ANOVA do estudo do maciço A.....	102
Tabela 11 – Valores das variáveis que compõem a equação de Johnson do maciço A.....	103
Tabela 12 – Valores calculados de K para os diferentes registos vibração obtidos no maciço A ...	104
Tabela 13 – Desvios obtidos da velocidade de vibração expectável comparativamente com a real no maciço A.....	105
Tabela 14 – Parâmetros médios do plano de fogo do maciço B.....	109
Tabela 15 – Valores de velocidade de vibração obtidos no maciço B	110
Tabela 16 – Preparação dos dados para a análise de regressão linear no estudo maciço B.....	111
Tabela 17 – Sumário dos resultados obtidos do cálculo da regressão múltipla linear e ANOVA do estudo maciço B	112
Tabela 18 – Valores das variáveis que compõem a equação de Johnson do maciço B	113
Tabela 19 – Valores calculados de K para os diferentes registos vibração obtidos no maciço B ...	114
Tabela 20 – Desvios obtidos da velocidade de vibração expectável comparativamente com a real no maciço B	115
Tabela 21 – Parâmetros médios do plano de fogo do maciço C.....	120
Tabela 22 – Valores de velocidade de vibração obtidos no maciço C	120
Tabela 23 – Preparação dos dados para a análise de regressão linear no estudo maciço C.....	121

Tabela 24 – Sumário dos resultados obtidos do cálculo da regressão múltipla linear e ANOVA do estudo maciço C	122
Tabela 25 – Valores das variáveis que compõem a equação de Johnson do maciço C	123
Tabela 26 – Valores calculados de K para os diferentes registos de vibração obtidos maciço C ..	124
Tabela 27 – Desvios obtidos da velocidade de vibração expectável comparativamente com a real no maciço C	125
Tabela 28 – Quadro resumo das constantes calculadas nos três maciços.....	127

Índice de Equações

Equação 3.1 – velocidade de propagação das ondas longitudinais	26
Equação 3.2 – velocidade de propagação das ondas transversais	26
Equação 3.3 – Velocidade de vibração	32
Equação 3.4 – Velocidade de vibração da onda sísmica	32
Equação 3.5 – Coeficiente de atenuação do maciço	32
Equação 3.6 – Coeficiente de atenuação do maciço	32
Equação 3.7 – Transmissibilidade do maciço.....	33
Equação 3.8 – Relação entre o parâmetro coeficiente de atenuação e o factor transmissibilidade	33
Equação 3.9 – Atenuação do maciço	34
Equação 5.1 – Resultante vectorial correspondente às três direcções no mesmo instante de tempo	54
Equação 6.1 – Valor limite da velocidade da vibração de pico	59
Equação 9.1 – Primeira lei de atenuação ondulatória de Morris	77
Equação 9.2 – Alteração da lei de atenuação ondulatória de Morris.....	77
Equação 9.3 – Critério de dano estabelecido pelo USBM	77
Equação 9.4 – Amplitude máxima da velocidade de partícula	78
Equação 9.5 – Relação empírica com amplitude máxima da velocidade da partícula	78
Equação 9.6 – Lei de propagação teórica	79
Equação 9.7 – Lei empírica após regressão linear	79
Equação 9.8 – Critério de dano para estruturas próximas de desmontes	80
Equação 9.9 – Fórmula de propagação das velocidades de vibração de Johnson	82
Equação 9.10 – Fórmula de propagação das velocidades de vibração de Langefors	85
Equação 11.1 – Aplicação de logaritmos à lei de propagação das velocidades	99
Equação 11.2 – Logaritmo da velocidade de vibração.....	99
Equação 11.3 – Logaritmo da carga explosiva por retardo.....	99
Equação 11.4 – Logaritmo da distância entre ponto de monitorização e detonação	100
Equação 11.5 – Equação de regressão linear múltipla	100
Equação 11.6 – Transformação do coeficiente b_0 em a	100
Equação 11.7 – Transformação do coeficiente b_1 em b	100
Equação 11.8 – Transformação do coeficiente b_2 em c	100
Equação 11.9 – Lei genérica de propagação das velocidades de vibração de Johnson para o maciço A	103

Equação 11.10 – Fórmula de propagação das velocidades de vibração de Langefors	103
Equação 11.11 – Fórmula de Langefors em função do coeficiente de transmissão K.....	103
Equação 11.12 – Lei genérica de propagação das velocidades de vibração de Langefors para o maciço A	104
Equação 11.13 – Lei genérica de propagação das velocidades de vibração de Johnson para o maciço B	113
Equação 11.14 – Lei genérica de propagação das velocidades de vibração de Langefors para o maciço B	114
Equação 11.15 – Lei genérica de propagação das velocidades de vibração de Johnson para o maciço C	123
Equação 11.16 – Lei genérica de propagação das velocidades de vibração de Langefors para o maciço C	124
Equação 11.17 – Equação que melhor se adequa ao maciço A.....	127
Equação 11.18 – Equação que melhor se adequa ao maciço B	127
Equação 11.19 – Equação que melhor se adequa ao maciço C	127

Lista de Anexos

Ver CD anexo

Lista de Abreviaturas

ρ_r - Densidade da rocha

ν - Coeficiente de Poisson

E - Módulo de Young

V_{Cp} - Velocidade de propagação das ondas longitudinais

V – Velocidade de vibração

f - Frequência de vibração

d - Amplitude máxima do deslocamento

A – Coeficiente de atenuação

F_t – Factor transmissibilidade

W - Energia fornecida à rocha

PVS – Cálculo do vector correspondente à três direcções no mesmo intervalo de tempo

V_l - Velocidade direcção longitudinal

V_t - Velocidade direcção transversal

V_v – Velocidade direcção vertical

V_L - Valor limite para a velocidade da vibração de pico

α - Factor tipo de fundação

β - Factor tipo de construção

γ - Factor número de solicitações diárias

RMR – Rock Mass Rating

RQD – Rock Quality Designation

λ – Amplitude do deslocamento

Q – Carga detonada por instante

D, R - Distância entre ponto de detonação e ponto de monitorização

K – Constante adimensional, factor de transmissão do terreno

D_s – Distância de segurança

a, b e c – Constantes adimensionais dependentes do local, diagrama de fogo e propagação das ondas

V_{ef} – Velocidade eficaz de vibração

b_0 , b_1 e b_2 – Coeficientes regressão linear múltipla

INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO DO TEMA

1. Introdução e enquadramento do tema

Presentemente, devido ao crescimento económico, há necessidade de adaptar as infra-estruturas ao seu uso corrente. Como tal, surgiu a necessidade de ocupação de novos espaços, realização de novos caminhos muitas vezes em locais de geologia mais competente e sem a possibilidade de escavação mecânica, levou ao incremento da utilização de explosivos para executar a escavação pretendida.

Hoje em dia, projectam-se cada vez mais obras de dificuldade técnica acrescida, construções de infra estruturas em locais mais condicionantes.

Neste aspecto o facto de se procurar soluções técnicas especiais origina a execução de cada projecto combatendo os condicionalismos existentes e desafiando a preservação do ambiente circundante.

O estudo dos maciços rochosos é fundamental para a execução de grandes projectos como túneis, estradas e barragens. Com a gradual importância na qualidade, segurança e ambiente, torna-se fundamental iniciar e terminar cada projecto com o menor impacto sobre o ambiente circundante, desde pessoas a bens.



Figura 1 – Emboquilhamento de um projecto de túnel (EPOS - Túnel do Marão, 2010)

Aqui em Portugal, vai-se verificando um gradual crescimento das obras públicas no que diz respeito à recorrência de utilização de explosivos. Exemplo disso serão as obras que se desenrolam para a realização do Túnel do Marão, Barragem Baixo Sabor, Barragem Venda Nova, Douro Interior, todas elas obras que, apesar dos seus fortes condicionalismos recorreu-se ao uso de explosivos civis para a sua realização.

O uso de explosivos é da maior importância no conjunto das operações de escavação em maciços rochosos. Estes tornaram-se desde cedo importantes para a execução de escavações em maciços rochosos resolvendo as dificuldades inerentes à desagregação de rochas duras (Bernardo, 2004).

É já prática corrente nos trabalhos geotécnicos, a utilização de substâncias explosivas em áreas onde existem diversos condicionalismos, com potenciais impactes ambientais nomeadamente vibrações que perturbam estruturas e terceiros.

Devido aos condicionalismos presentes, urge a necessidade de monitorização e implementação de medidas pró-activas de segurança e minimização do impacto ambiental.

O desmonte de rocha é uma das operações na movimentação de maciços, que frequentemente origina diversos efeitos secundários, influenciando directamente o ambiente circundante e por vezes, limitam e dificultam a execução dos projectos. (Dinis da Gama, 1998; in Bernardo, 2004)

Estes tipos de trabalho vão ser fortemente condicionados pelos efeitos secundários que irão influenciar no ambiente circundante. O meio circundante é muitas vezes o factor determinante no tipo de operações a utilizar para a execução do projecto de movimentação do maciço.

Os efeitos secundários existentes da aplicação de explosivos tornam-se cada vez mais importantes de controlar, minimizar e se possível eliminar. É natural que numa obra que desenvolva por várias etapas de construção, a que origina um maior impacto visual será o desmonte com explosivos. Como tal, vai estar sempre fortemente influenciada pelas queixas de pessoas que querem os seus bens protegidos, e como tal, serão rigorosamente monitorizadas.

Com base neste rigor, torna-se fundamental encontrar um método de aquisição e quantificação dos efeitos secundários provocados pelos explosivos. Este método em relação ao condicionalismo das vibrações será o registo das velocidades de vibração provocada no terreno após a detonação e que servirá para avaliar, antecipar e controlar os efeitos secundários e possíveis danos a ocorrer na realização do trabalho.

Hoje em dia os requisitos de protecção ambiental são cada vez mais restritivos. A utilização de explosivos obriga aos seus utilizadores a abandonarem práticas empíricas e procurarem a

optimização constante da qualidade dos seus trabalhos, minimizando os riscos associados. Deverá aplicar-se critérios técnicos que avaliem a legitimidade dos trabalhos executados e analisem os danos criados (Dinis da Gama, 1998).

As principais prevenções a tomar no uso de explosivos, centram-se obrigatoriamente na protecção de pessoas e bens dos efeitos secundários provenientes, como projecções de rocha, vibrações e ruído.

O desenvolvimento das técnicas de desmonte de rocha com explosivos e do próprio explosivo, tornou possível a execução deste tipo de operações em locais com algumas condicionantes. Nas últimas décadas tornou-se frequente a utilização de explosivos em obras localizadas em áreas urbanas, uma vez que se tornou necessário a realização de novas vias de comunicação como túneis, e a geração de novas infra estruturas como barragens, estações subterrâneas de armazenamento, desenvolvimento e ampliação de estações eléctricas e nucleares (Olofsson, 1997).

O elevado preço das áreas urbanas, tornou possível a utilização do subsolo “abaixo da superfície”, com espaços como garagens, escritórios, reservatórios, entre outros. Para a execução deste tipo de obras as vibrações vão constituir uma ameaça à propriedade e à vida humana, sendo por isso fundamental o seu controle (Olofsson, 1997).

OBJECTIVO DO ESTUDO

2. Objectivo do estudo

Este trabalho pretende caracterizar alguns maciços rochosos no que diz respeito à sua atenuação dinâmica e correspondente lei de propagação das velocidades de vibração. Esta caracterização será executada por intermédio de regressões lineares sobre as fórmulas de Langefors e Jonhson, caracterizadas adiante neste trabalho.

Através da formulação da lei de propagação de vibrações consegue-se estabelecer a quantidade máxima de explosivo a utilizar por tempo em determinado maciço, assegurando o mínimo de impacte ambiental associado, assim como o cumprimento da norma portuguesa.

Desta forma, na execução de qualquer projecto que envolva desmonte de rocha, a utilidade de ter uma ferramenta capaz de prever as velocidades de vibração impostas na execução do plano de fogo, torna-se fundamental.

Pretende-se com este estudo designar qual das fórmulas é mais indicada para cada tipo de maciço estudado, recorrendo a monitorizações reais de diferentes escavações em diferentes tipos geológicos de maciço. A partir dos dados obtidos no terreno será feito através do uso de regressões lineares múltiplas, a formulação da lei de propagação de velocidades.

Desta forma e obtendo a melhor correlação para o tipo de maciço em questão, consegue-se em projectos futuros e de acordo com a geologia presente aplicar a melhor destas equações.

Para a realização deste trabalho foi necessário o acompanhamento de vários desmontes em pedreiras e obras públicas, aliados a uma monitorização das velocidades de vibrações originadas pelas detonações nos locais.

Para cada desmonte foram estipulados pontos de monitorização, habitualmente situados nas estruturas mais próximas das zonas de detonação de explosivos e que se devem proteger no que diz respeito às vibrações.

Após a escolha dos pontos de monitorização estabeleceu-se os parâmetros base da pega de fogo, nomeadamente diâmetro de perfuração, malha de perfuração, altura de bancada, sub-furação e tipo de carga e propriedades do explosivo e total de carga a utilizar.

O valor obtido de vibração vai ser comparado com a Norma e verifica-se se existe necessidade de alterar alguns ou todos os parâmetros do plano de fogo base. As distâncias entre o ponto de

detonação e monitorização assim como a carga de explosivo utilizada por tempo deverão ser registadas em cada detonação realizada.

Desta forma, após a execução de vários desmontes e a recolha de dados referentes aos registos de vibração dos mesmos, consegue-se com o volume de dados obtidos, e utilizando as leis de propagação supracitadas, a aquisição dos parâmetros constantes nas equações de Johnson e Langefors.

A ideia base deste estudo é a comparação destas duas leis de propagação das velocidades de vibração no maciço e verificar, após a obtenção dessas constantes adimensionais e a simulação de velocidades de vibração de acordo com a carga de explosivo detonada por tempo, qual a que melhor se adequa ao diferente tipo de maciço em questão.

Logo, esta tese está organizada da seguinte forma: apresentação dos parâmetros base do plano de fogo, recolha de dados, tratamento estatístico para obtenção das constantes referentes a cada uma das fórmulas, formulação das leis de velocidade de propagação de cada maciço e finalmente simulação de velocidades vs cargas por tempo vs distâncias para obter qual das fórmulas será melhor ajustada ao maciço em questão.

VIBRAÇÕES

3. Vibrações

3.1. Definição

Uma vibração é um movimento oscilatório de um material, sólido ou fluído, que foi afastado da sua posição de equilíbrio. A nível Geotécnico, a vibração é tida como uma resposta elástica do terreno, constituído por solos e/ou rochas, à passagem de uma onda de tensão, com origem directa ou indirecta numa solicitação dinâmica de génese artificial ou natural (Bernardo, 2004). Este movimento oscilatório vai provocar a alteração da posição de equilíbrio de um determinado material.

A vibração é a resposta elástica do terreno quando é atravessado por uma onda de tensão provocada por uma solicitação dinâmica criada directa ou indirectamente (Bernardo, 2003).

As vibrações resultam da aplicação sobre o terreno, de forças exteriores, com um tempo de actuação curto, ou de forças aplicadas de modo contínuo com intensidade variável no tempo. (Sarsby 2000).

As vibrações são portanto, solicitações dinâmicas que se transmitem pelos terrenos, seja por causas naturais ou por acções humanas. Estas vibrações ocorrem sob a forma de ondas, diminuindo de intensidade até a sua completa atenuação.

As vibrações originam-se com a aplicação ao terreno de forças externas de intervalo de tempo de actuação curto ou de forças aplicadas continuamente com intensidade variável ao longo de um intervalo de tempo.

Após a libertação de energia no terreno, origina-se a propagação multi-direccional de ondas volumétricas e superficiais, que ao atingirem estruturas, a sujeitam a forças de inércia, originando uma tendência do mesmo em acompanhar os movimentos presentes no terreno (Bernardo, 2003).

Segundo Dinis da Gama 2003, a propagação destas ondas volumétricas e superficiais que atingem as estruturas e pessoas dependem dos seguintes factores:

- Quantidade de energia aplicada;
- Distância entre ponto de origem e ponto onde se registam os efeitos;
- Propriedades transmissoras e dissipadoras dos terrenos presentes;
- Resistência dinâmica das estruturas.

A resposta do terreno às solicitações dinâmicas é utilizada para avaliar a resposta das estruturas face ao movimento do maciço.

A detonação de explosivos em maciços rochosos traduz-se principalmente pela criação de ondas de tensão compressivas, como resultado da refração da onda de choque nas paredes do furo. Como as cargas explosivas são geometricamente cilíndricas as frentes de onda são constituídas por uma onda de forma cónica, que se propaga ao terreno circundante, até se reflectir na superfície livre, ocasionando roturas na rocha contígua. Os efeitos da detonação sentem-se sob a forma de vibrações que se atenuam com a crescente distância ao ponto de origem.

Segundo Bernardo, os parâmetros que caracterizam as ondas são:

- Amplitude (m), que pode ser expressa na forma de deslocamento, velocidade de vibração ou de uma aceleração;
- Período (s);
- Comprimento de onda (m);
- Frequência (Hz).

Sendo a velocidade da partícula o parâmetro que melhor define a propagação das ondas sísmicas no maciço.

3.2. Ondas Sísmicas

A tensão originada com a detonação de explosivo deverá ser superior à resistência dinâmica da rocha para existir facturação. No momento em que a tensão seja inferior à resistência dinâmica da rocha, a deformação da mesma dá-se na forma de propagação ondulatória. Esta deformação é transmitida por todas as partículas, constituindo uma onda sísmica de tensão que provocam as vibrações no terreno circundante. Para estas ondas de tensão existirem os materiais rochosos terão de ter natureza elástica. Com esta propriedade os materiais deformam-se mediante a solicitação aplicada e findada esta retomam a sua forma inicial (Bernardo, 2004).

As ondas sísmicas são caracterizadas por:

- Ondas P: também chamadas de primárias ou de compressão. É a onda mais rápida que percorre o maciço. As partículas da onda movem-se na mesma direcção de propagação. A densidade do material atravessado por ela varia após a sua passagem.
- Ondas S: Também designadas por secundárias ou de cisalhamento. Movimentam-se pelo meio a uma velocidade menor que as ondas P. Estas ondas modificam a forma do material mas não a sua densidade.
- Ondas R: As ondas Rayleigh são ondas de superfície que atenuam rapidamente em profundidade. Propagam-se mais lentamente que as anteriores e as suas partículas movem-se de forma elíptica no plano vertical e na mesma direcção da propagação. Na superfície o movimento é contrário ao movimento da onda.

Existem diferentes tipos de ondas de tensão, as volumétricas e as de superfície. As volumétricas, transmitem-se de forma radial a partir da fonte de propagação. As restantes ondas dependem do meio pelo qual se propagam.

As ondas volumétricas são as mais frequentes em zonas próximas de onde se aplicam explosivos. Este tipo de onda é caracterizado pela sua elevada frequência e rápida atenuação.

As ondas de superfície, têm velocidade inferior às volumétricas e são definidas pela sua baixa frequência e elevada energia transportada sendo por isso detectáveis a grandes distâncias.

As ondas volumétricas são: as ondas longitudinais (ondas “P”) e as ondas transversais (ondas “S”).

As ondas de superfície são: as Rayleigh (ondas “R”) e as Love (ondas “L”).

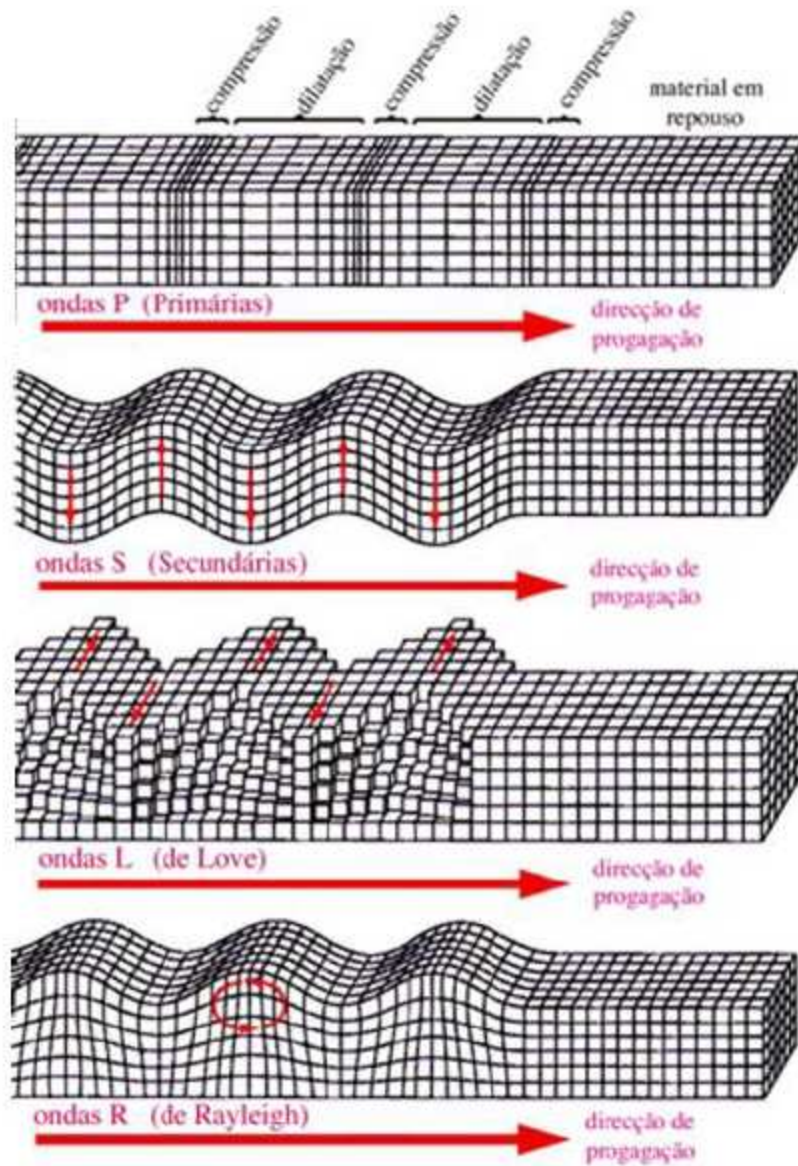


Figura 2 – Tipos de ondas sísmicas (Louro, 2009)

A velocidade de propagação das ondas longitudinais e das transversais podem estimar-se a partir das características elásticas dos materiais com as seguintes expressões:

$$VCp = \sqrt{\frac{E \times (1 - \vartheta)}{\rho r \times (1 - 2\vartheta) \times (1 + \vartheta)}} \quad (3.1)$$

$$VCs = \sqrt{\frac{E}{2 \times \rho r \times (1 + \vartheta)}} \quad (3.2)$$

Onde:

ρ_r - Densidade da rocha

ν - Coeficiente de Poisson

E - Módulo de Young

V_{Cp} e V_{Cr} - Velocidade de propagação das ondas longitudinais e transversais respectivamente.

As ondas longitudinais, propagam-se pelo terreno, originando alternadamente dilatações e compressões. Manifestam-se em todos os corpos rochosos e são responsáveis pela alteração de volume nos materiais que atravessam.

As ondas transversais propagam-se pelo meio dando origem a um movimento de corte. Movimento esse que provoca a alteração das formas dos materiais por onde passa mas não o seu volume. Possuem menor velocidade de propagação do que as supracitadas.

As ondas Rayleigh provocam em simultâneo distorção do meio com um movimento longitudinal e movimento transversal. Esta combinação de acções origina um movimento das partículas situadas na superfície. Vários investigadores concluíram que estas ondas transportam cerca de 80 % da energia total, logo poderá ser a máxima responsável pelas vibrações detectadas a grandes distâncias do local de utilização de explosivos e o efeito de maior potencial risco para as estruturas situadas a grandes distâncias.

As ondas Love manifestam-se quando existem estratos geológicos de propriedades distintas, sendo por isso o seu movimento horizontal e perpendicular à direcção de propagação da onda.

As vibrações no terreno são uma forma de transporte de energia através do solo, e a uma certa intensidade podem provocar danos a estruturas adjacentes. Parte da energia proveniente do rebentamento, propaga-se sobre a forma de ondas sísmicas em todas as direcções com diferentes amplitudes e frequências (Olofsson, 1997).

A energia dessas ondas diminui ao longo da distância sendo que as ondas com maior frequência tendem a atenuar mais rapidamente. Isto significa que as frequências dominantes resultantes da detonação são altas a curtas distâncias de propagação e reduzidas a altas distâncias de propagação (Olofsson, 1997).

3.3. Efeitos das cargas explosivas

Quando se detona uma carga explosiva num furo previamente aberto no maciço rochosos, esta detonação origina facturação e rotura da rocha, desenvolvendo-se este processo em duas fases distintas (Dinis da Gama, 2003). A interacção entre estas duas fases influencia o desempenho dos explosivos na escavação de maciços rochosos.

Inicialmente surge a fase dinâmica onde o maciço é sujeito a uma perturbação dinâmica violenta aplica num intervalo de tempo reduzido e que é produzida por uma onda de choque que se desloca a uma velocidade variável consoante o tipo de rocha presente. Esta onda de choque vai-se propagar radialmente a partir do furo e irá atenuar-se à medida que vai afastando do centro de propagação (Bernardo, 2004).

A fase seguinte, denominada de quase-estática é caracterizada pela expansão dos gases que resultam da detonação do explosivo, originando tensões elevadas em regime quase estacionário.

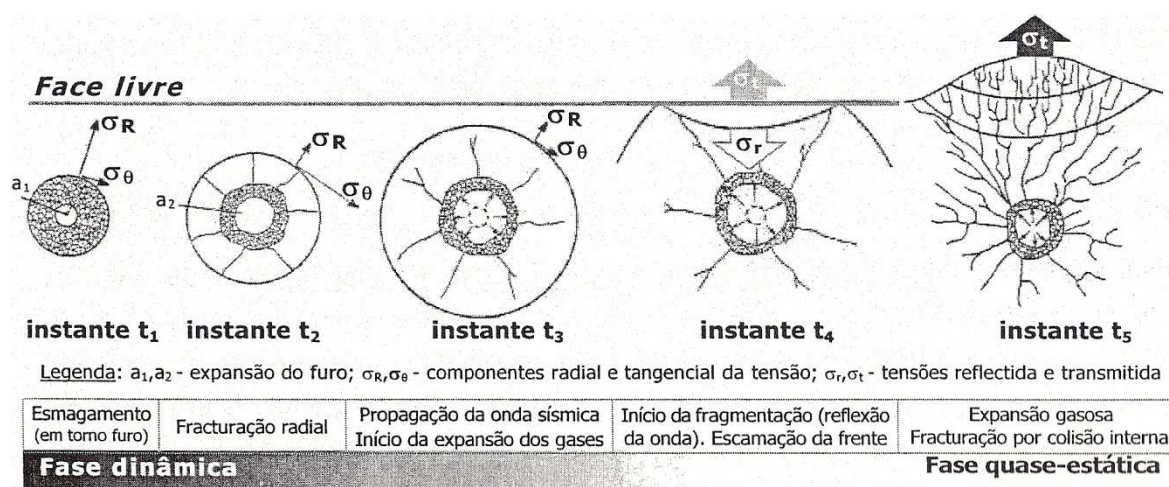


Figura 3 – Fases da detonação de explosivo (adaptado de Hartman, 1992)

Resumidamente a fase dinâmica corresponde à acção das ondas de choque directamente sobre o maciço enquanto a fase quase-estática corresponde ao movimento interno do maciço devido à expansão de gases.

A maior parte da energia produzida pela detonação de uma carga explosiva é transferida ao ambiente circundante sob a forma de impactes ambientais, como vibrações transmitidas aos terrenos, projecções de rocha, poeiras e sobrefacturação do maciço remanescente.

A intensidade destes impactes está directamente relacionada com os parâmetros de dimensionamento das pegas de fogo. Como tal, os mesmos devem ser criteriosos e globalmente ajustados para interferirem o mínimo com o ambiente circundante.

A fragmentação da rocha é influenciada pelos seguintes factores:

- Parâmetros geológicos, geotécnicos e geomecânicos do maciço;
- Perfuração específica;
- Carga específica;
- Diagrama de fogo;
- Inclinação do furo;
- Desvio do furo;
- Extensão da pega.

A fragmentação é afectada mais directamente pelas características do maciço do que pelo explosivo utilizado no desmonte. As propriedades que mais influenciam a fragmentação de uma rocha são as forças de tensão e de compressão, densidade, velocidade de propagação sísmica, dureza e estrutura da mesma. Muitas rochas possuem forças de tensão muito inferiores às forças de compressão. Para se obter uma boa fragmentação, a força de compressão da rocha tem de ser vencida, caso contrário esta não fragmentará (Olofsson, 1997).

Assim sendo, as rochas com elevadas densidade necessitam de maior carga explosiva para se deslocarem e partirem.

A velocidade de propagação sísmica varia bastante de acordo com o tipo de rocha existente. Estudos revelam que deve-se utilizar explosivos com elevada velocidade de detonação para se obter uma boa fragmentação em maciços de maior velocidade de propagação sísmica.

A dureza da rocha pode ter grande efeito no resultado final da fragmentação. Num maciço constituído por rocha menos competente, as zonas que não sofreram carga directa de explosivos poderão ser normalmente carregadas uma vez que o efeito da fragmentação alastrou-se até essas zonas. Por sua vez, em rochas muito duras e competentes, qualquer parte que não seja carregada poderá originar blocos de difícil carga e transporte (Olofsson, 1997).

A estrutura da rocha deverá ser correctamente analisada previamente ao rebentamento. Esta análise deverá incidir sobre a direcção e espaçamento das diáclases de forma a ajustar o diagrama de fogo a estas características. A estrutura geológica é o factor determinante do diâmetro de perfuração a utilizar. Falhas e planos de estratificação tendem a isolar blocos de rocha na zona da

distância à frente. Quanto maior a malha de perfuração, mais a probabilidade de aparecimento destes blocos. Uma maior perfuração específica com diâmetros de perfuração menores, vai permitir a melhor distribuição do explosivo na rocha (Olofsson, 1997).

Através do tamanho máximo dos fragmentos obtidos pelo uso de explosivos, Dinis da Gama & Jimeno correlacionam esse parâmetro com alguns critérios de minimização dos custos nos desmontes. Esta correlação é ainda válida para a minimização dos impactes ambientais resultantes da utilização de explosivo.

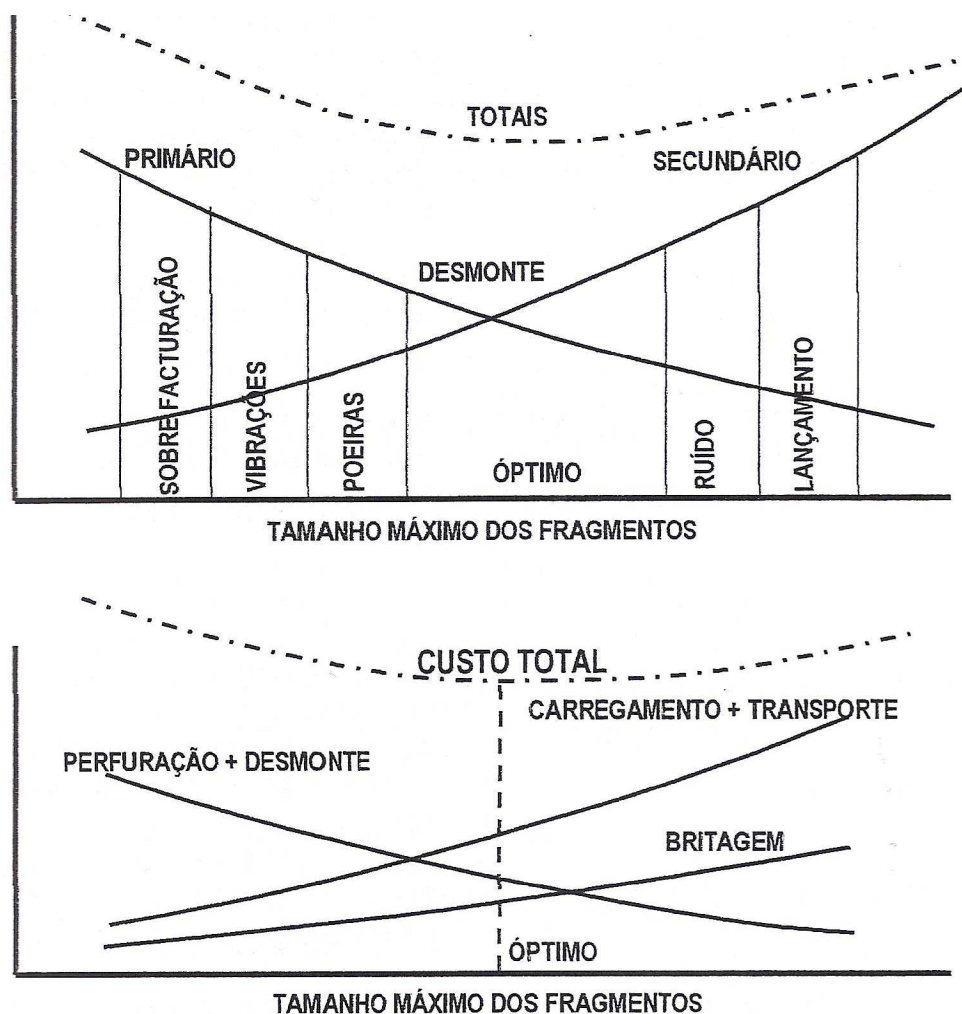


Figura 4 – Correlação entre os critérios de minimização do custo dos desmontes com os impactes ambientais (Dinis da Gama & Jimeno, 1993)

3.4. Dinâmica das rochas

Solos e rochas são materiais porosos com uma relativa rigidez do seu esqueleto de partículas. Os poros são preenchidos com água ou ar. Num solo, o seu esqueleto é constituído por grãos minerais fixos uns aos outros por forças coesivas e de fricção. Em rochas sedimentares, os grãos minerais são cimentados ao mesmo tempo e nas rochas metamórficas os minerais cristalizam em uma massa rochosa que usualmente possui fissuras preenchidas por água (Olofsson, 1997).

Desta forma, na prática torna-se muito difícil estabelecer com precisão a velocidade de propagação da onda sísmica nos diferentes tipos de solos e rochas.

Segundo Olofsson, cada ambiente geológico tem as suas próprias características que afectam a velocidade de propagação das ondas, sendo elas as seguintes:

- Constantes elásticas do terreno que determinam a velocidade de propagação das ondas;
- Tipo de solo e sua profundidade que influencia a frequência dominante e o tipo de ondas;
- Humidade do solo e nível freático;
- Topografia e morfologia;
- Características de atenuação do terreno.

A Dinâmica das rochas, em relação às suas propriedades mecânicas e mecanismos de rotura, é utilizada como forma de descrever a acção dos explosivos nos maciços rochosos.

Os materiais rochosos, na presença de uma solicitação externa, apresentam variações do seu comportamento mecânico no intervalo de tempo em que ocorre a solicitação.

A caracterização do tipo de maciço pode ser definida com a determinação das propriedades dinâmicas dos maciços. Esta caracterização inicia-se por uma campanha de ensaios de campo que prevê a utilização de sismógrafos apropriadamente localizados no terreno em relação à zona de desmonte e que efectuem um levantamento das vibrações provenientes das detonações (Dinis da Gama, 1998).

Após a detonação, os diversos geofones colocados na superfície do terreno equidistantes, recebem o impulso sísmico em diferentes intervalos de tempo e regista-os. As amplitudes dos

movimentos são expressas em termos de deslocamentos e convertidas para velocidades de vibração pela relação:

$$V = 2 \pi f d \quad (3.3)$$

Sendo f (Hz) a frequência de vibração, e d a amplitude máxima do deslocamento.

O registo de vibração pode ser utilizado para definir a velocidade de propagação das ondas longitudinais através de um maciço. Utilizando dois geofones, 1 e 2, e partindo do princípio que ambos recebem o mesmo impulso sísmico no instante t_1 e t_2 após a detonação a velocidade de propagação da onda sísmica será:

$$c = \frac{(L_1 - L_2)}{(t_2 - t_1)} \quad (3.4)$$

Onde o numerador representa a distância entre os geofones medida na superfície do terreno (Dinis da Gama, 1111).

3.5. Atenuação Dinâmica

O principal objectivo da correcta caracterização dinâmica do maciço consiste em compreender melhor a propagação das ondas sísmicas e as propriedades dissipadoras do maciço. O atrito interno das rochas envolve um conjunto de transformações da energia sísmica propagada através do meio sob forma de perdas caloríferas, por atrito e por desvios de comportamento elástico (Dinis da Gama, 1998).

Este mecanismo pode ser definido pelo conceito coeficiente de atenuação.

$$A = A_0 e^{-\alpha L} \quad (3.5)$$

Onde A , representa a amplitude da tensão na frente da onda sísmica, registada a uma distância L do ponto de detonação, cuja amplitude na origem é A_0 . α representa o coeficiente de atenuação que será tanto maior quanto mais dissipativa for a rocha.

Quando se registam em dois geofones vizinhos (1 e 2) colineares a mesma frente de onda, medindo as respectivas amplitudes pode-se calcular imediatamente o coeficiente de atenuação por:

$$\alpha = \frac{1}{L_2 - L_1} \ln \frac{A_1}{A_2} \quad (3.6)$$

O factor transmissibilidade é também um parâmetro que caracteriza a dissipação da onda sísmica no maciço. Este factor é um pouco mais abrangente que o coeficiente de atenuação e caracteriza-se por:

$$Ft = 2\pi\left(\frac{W}{\Delta W}\right) \quad (3.7)$$

Onde W representa a energia fornecida à rocha através de um ciclo dinâmico, uma parte da qual ΔW é dissipada.

Existem classificações das rochas baseadas neste parâmetro que assume valores desde 30 a 200, sendo maiores quanto menores dissipativas as rochas.

Jaeger & Cook em 1969, traçaram uma relação entre o parâmetro coeficiente de atenuação e o factor transmissibilidade:

$$Ft = \frac{\pi f}{c\alpha} \quad (3.8)$$

Onde f traduz a frequência dominante da vibração e c a velocidade de propagação das ondas sísmicas no meio em análise.

O meio de propagação de um maciço rochoso é de carácter não elástico, anisótropo, heterogéneo e descontínuo. A energia fornecida por uma detonação irá dissipar-se com o tempo atenuando totalmente devido a mecanismos de dissipação de energia. O percurso das vibrações resultantes da aplicação de explosivos poderá simplificar-se como uma propagação das ondas segundo um movimento harmónico.

A atenuação das ondas acontece quando existe um decréscimo da amplitude do impulso com a distância e tempo percorrido (Dinis da Gama, 2003). Esta atenuação depende das propriedades dos sólidos em questão. Todos os sólidos quando submetidos a solicitações dinâmicas transformam parte dessa energia em calor, que através do atrito entre partículas a nível interno vai originar a dissipação da energia.

Segundo Dinis da Gama, com estudos efectuados na análise das expressões que caracterizam a atenuação dos maciços pode-se retirar as seguintes conclusões:

- Para cargas semelhantes, detonadas às mesmas distâncias, as formações geológicas mais atenuadoras das amplitudes das ondas, dão origem a maiores velocidades vibratórias do que as menos dissipadoras.

- Esta contradição explica-se pelo facto das relações entre as velocidades vibratórias e as tensões dinâmicas serem do tipo:

$$\alpha = \rho c v \quad (3.9)$$

Onde ρ representa a massa específica e c a velocidade de propagação das ondas sísmicas

- As litologias mais atenuadoras possuem em simultâneo menores valores do produto ρc (impedância da rocha), originando que as tensões dinâmicas atenuem mais rapidamente não acontecendo o mesmo para as velocidades de vibração.

A maior parte da energia resultante de uma detonação, dissipa-se no interior do maciço rochoso, produzindo fracturas, projecções de fragmentos e deformações plásticas e elásticas.

Segundo Sarsby (2000), em qualquer ponto do interior do maciço circundante, o movimento máximo das partículas a vibrar deve-se a uma das componentes da onda. Em resultado da distribuição desigual de energia a vibração decresce de forma irregular com o aumento da distância percorrida. Pode-se dizer que a amplitude da vibração depende da intensidade da perturbação gerada. A frequência vai depender da rigidez e inércia do sistema vibratório.

Os efeitos das vibrações sobre as estruturas não depende por si só da distância ao ponto de detonação e do tipo de estrutura, mas dependem também da litologia dos materiais de fundação. Como tal, torna-se fundamental conhecer o tipo de terreno onde as fundações da estrutura assentam.

MINIMIZAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

4. Minimização das Vibrações

Diferentes factores interferem com a diminuição das vibrações com o aumento de distância, são elas: a progressiva separação das três componentes das ondas, as descontinuidades existentes no maciço e o atrito interno característico das rochas.

Na realidade, como acontece em meios estratificados, as ondas podem sobrepor-se e concentrar-se chegando mesmo a atingir valores mais elevados a distâncias superiores (Azevedo & Patrício, 2003).

O tipo de litologia dos materiais das fundações dos edifícios, sobre os quais as estruturas assentam, tem forte interferência nos efeitos das vibrações.

Segundo Kramer (1996), as principais características das vibrações em terrenos são a amplitude, frequência e duração.

A minimização das vibrações passa essencialmente, pela prevenção e optimização dos diagramas de fogo no sentido de controlar os valores das velocidades de vibração, através do conhecimento das características do meio de propagação e das distâncias entre focos.

Devem ser cuidadosamente dimensionados os parâmetros da geometria do diagrama de fogo, o tipo de iniciação a utilizar e, caso aplicável, o tipo de pré-corte a realizar.

A orientação das frentes da escavação poderá ser um factor determinante na redução das vibrações. Em relação aos parâmetros do diagrama de fogo, o que possui mais afinidade na geração de vibrações será o afastamento, uma vez que é através dele que se maximiza a energia do explosivo na fragmentação do maciço em vez de a concentrar na propagação sísmica no maciço (Bernardo, 2004).

Convém salientar que utilizando afastamentos excessivamente baixos, aumenta-se o risco de projecções além de elevar o custo associado ao trabalho de desmonte.

O uso de frentes com a devida inclinação propicia uma minimização das vibrações.

Outro parâmetro que afecta determinantemente o valor das vibrações é a altura da bancada, uma vez que está directamente proporcional à carga explosiva utilizada. O diâmetro de perfuração também produz a mesma relação de proporcionalidade, quanto maior for a carga utilizada. Este aumento da carga explosiva utilizada, que como se viu na equação acima descrita é proporcional à

velocidade vibratória no maciço, vai intensificar a amplitude da energia sísmica no maciço (Olofsson, 1997).

Segundo Olofsson, a carga operante máxima poderá ser diminuída da seguinte maneira:

- Sequência de iniciação, diminuindo a repetição de furos com o mesmo tempo de detonação;
- Reduzir a malha de perfuração, menor a malha de perfuração mais proximidade entre furos com menor quantidade de carga em cada um deles;
- Dividir as cargas, dividir a carga total do furo em duas ou mais cargas parciais, separadas por material inerte;
- Diminuir a altura da bancada, desta forma a profundidade será menor, logo a quantidade de explosivo utilizada também.

Uma forma eficaz de reduzir e controlar as vibrações é a utilização de iniciações múltiplas, reduzindo assim a carga por retardo.

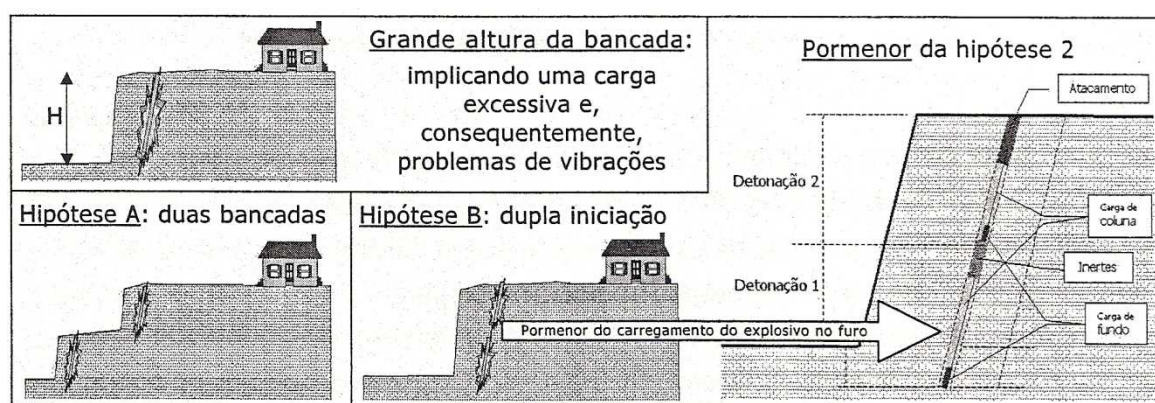


Figura 5 – Utilização de iniciações múltiplas para redução da carga por retardo (Bernardo, 2004)

$A \gg 60\varnothing_f$	$A \approx 60\varnothing_f$	$25\varnothing_f < A < 40\varnothing_f$	$A < 20\varnothing_f$
Intensidade de <u>vibração muito significativa</u> . Sem desmonte, e com fragmentação localizada nas imediações do furo	Intensidade de <u>vibração significativa</u> . Sem desmonte, mas com intensa fragmentação entre o furo e a face livre	Intensidade de <u>vibração pouco significativa</u> . Com desmonte, da rocha entre o furo e a face livre, equilibrado e bem deslocado	Intensidade de <u>vibração insignificante</u> . Desmonte, da rocha entre o furo e a face livre, sobre-fragmentado e deslocado
Sobredimensionado		Correcto (Equação 3.2)	Subdimensionado

Figura 6 – Influência do afastamento na geração de vibrações (adaptado de Berta, 1985; retirado de Jimeno et. al 1995)

Os estudos prévios tornam-se por isso fundamentais para conhecer geológica e mecanicamente o meio e com isso ajustar as cargas explosivas para o mínimo necessário para fragmentar a rocha e torna-la ripável.

Após a detonação, a maior parte das vibrações são registadas na retaguarda da frente da escavação, uma vez que é nessa direcção que o maciço se apresenta contínuo. Como não existem interfaces litológicas capazes de reflectir as ondas sísmicas estas, são desviadas pelo vazio criado pela escavação apenas na profundidade, sendo que as restantes propagam-se para a retaguarda. Deste facto, se salienta a correcta orientação das frentes, assim como as direcções do avanço como forma de minimizar os efeitos das vibrações sobre as estruturas (Dinis da Gama, 2000).



Figura 7 – Influência da direcção na geração de vibrações (Bernardo, 2004)

Analisando a figura acima, conclui-se que no primeiro caso a estrutura vai estar mais sujeita a vibrações. Enquanto no segundo caso, existe uma maior protecção da estrutura, exceptuando nos primeiros desmontes, que como estarão mais próximos vão originar sobrepressões de onda aérea na estrutura, assim como maior probabilidade de ocorrência de projecções. No segundo caso as componentes horizontais das vibrações (ondas L e T) são muito menores em relação ao primeiro caso (Bernardo, 2004).

Um dos principais métodos de controlo das vibrações verifica-se com a utilização de retardos ou microretardos entre furos. Esta técnica permite reduzir a carga que detona por tempo, que vai minimizar a velocidade vibratória sem prejudicar a produção pois ao utilizar esta técnica aumenta-se o rendimento pois cria-se faces livres suplementares às pré-existentes facilitando com isso a fragmentação.

As pegas de fogo devem ser disparadas para que a direcção principal do movimento da rocha seja norma à face livre. É importante que o movimento para a frente não diminua com a colisão e interacção de rocha fragmentada.

Para existir um óptimo deslocamento de rocha, como se pode analisar na figura abaixo, são necessárias cargas específicas elevadas o que potenciam maiores vibrações e menor estabilidade final no maciço remanescente.

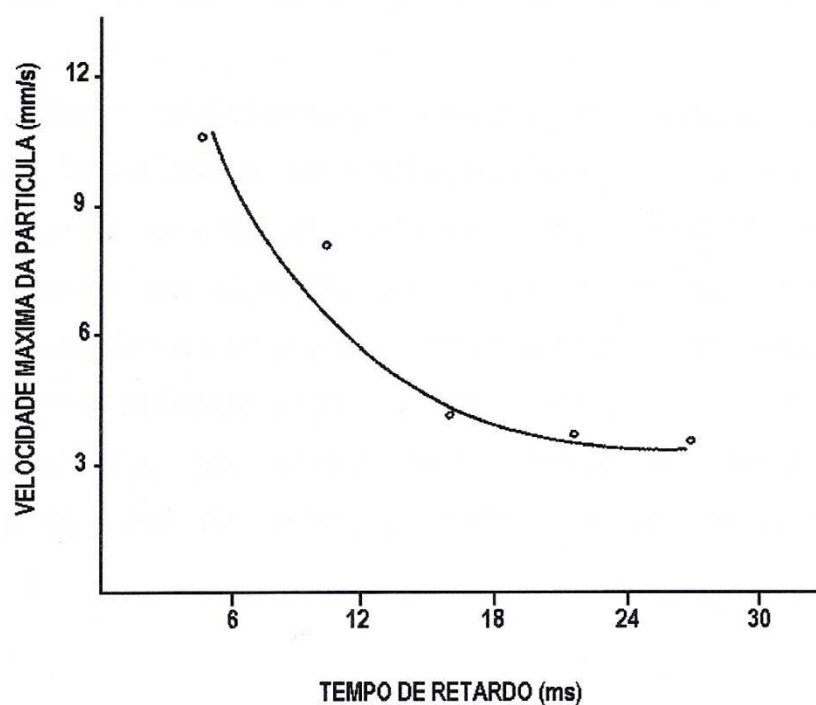


Figura 8 – Gráfico da relação entre intervalo de retardo e velocidade de partícula (Jimeno e tal 1995)

O tempo de retardo mais utilizado entre furos consecutivos é o de 25 ms. Estudos desenvolvidos por Duvall et al e Langefors (1963), Wiss & Lineham (1978), sugeriam o uso de tempo de 8ms e 17 ms. (Jimeno et al. 1995). Contudo, trabalhos posteriores realizados pela Nobel's Explosive Co, estabeleceram o intervalo de 25 ms, como o mínimo para garantir a não sobreposição de ondas para a gama habitual de cargas e distância mais utilizadas nas detonações.

O objectivo destes retardos é o de tornar sempre a rocha o menos confinada possível para um melhor deslocamento da mesma.

A primeira carga a detonar deve ter tempo suficiente para separar a rocha de forma independente da restante zona a desmontar. A velocidade de deslocação deste volume prismático está obviamente limitada pelas forças de cisalhamento impostas pelas faces laterais da rocha remanescente (Jimeno e tal, 1995).

O retardo existente entre fiadas consecutivas deve ser o máximo conseguido salvaguardando o risco de projecções ou cortes de ligações.

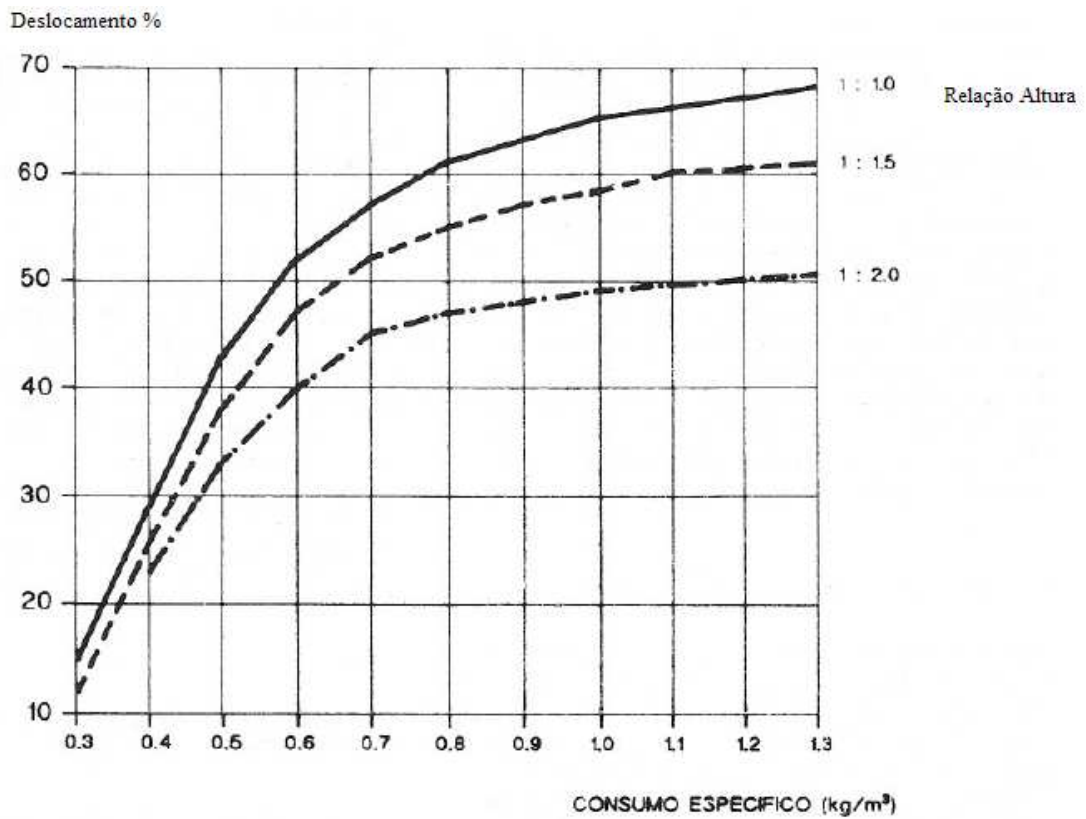


Figura 9 – Curvas de deslocamento da rocha em função do consumo específico (Jimeno e tal, 1995)

A escolha indicada do retardo influencia directamente o movimento do maciço e com isso a fragmentação. O ideal será que a distância à frente dos furos detonados tenha tempo para se deslocar imediatamente antes da detonação dos furos e fiadas seguintes.

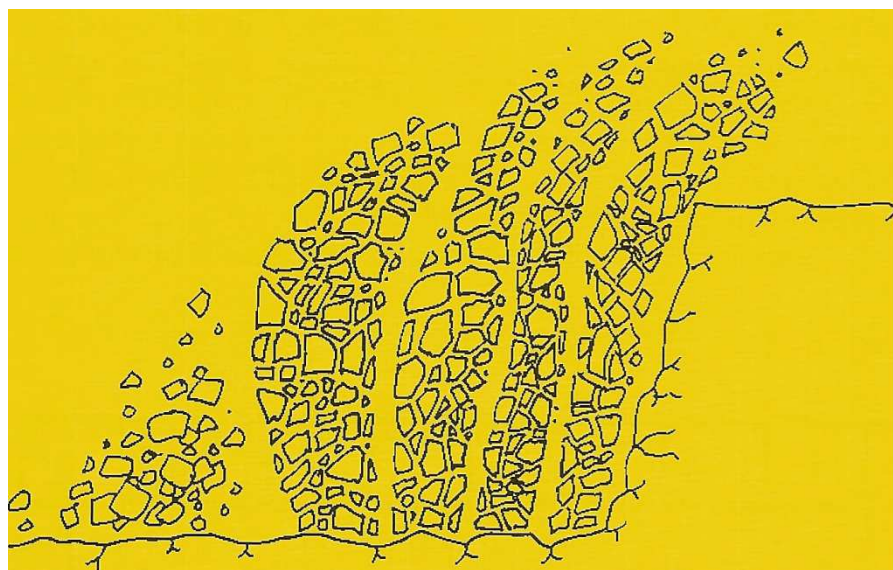


Figura 10 – Retardo pequeno entre fiadas (Olofsson, 1997)

Nesta caso verificamos que a escolha de retardo foi muito curta o que provoca que a rocha das fiadas mais atrás se movam numa direcção mais vertical e não horizontal, provocando um encavalitamento da rocha nessa zona.

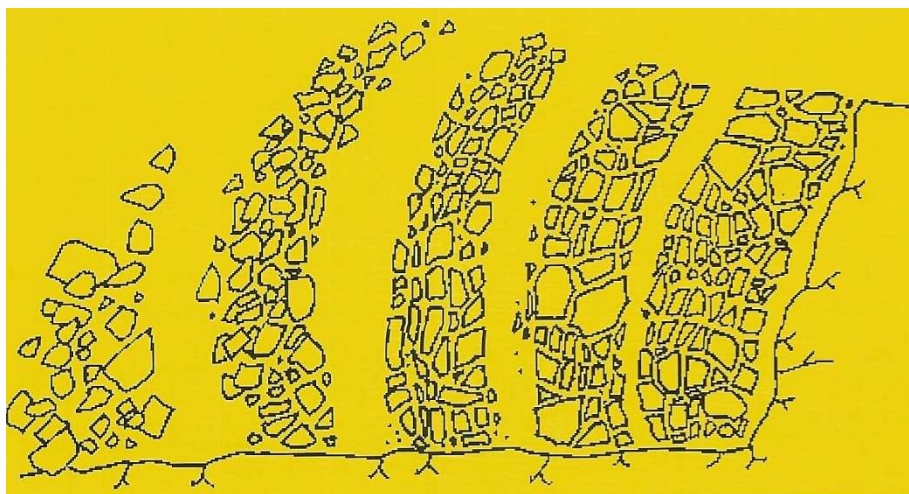


Figura 11 – Retardo ideal entre fiadas (Olofsson, 1997)



Figura 12 – Exemplo de um desmonte com os retardos bem seleccionados (Agrepur Canas de Senhorim, 2006)

Neste caso, o retardo escolhido foi o ideal permitindo o deslocamento horizontal do maciço com um bom espalhamento.

Salienta-se que a escolha de retardos muito elevados pode provocar projecções, forte onda aérea e o aparecimento de grande blocos resultantes do desmonte da pega de fogo. Neste caso o movimento de deslocamento do maciço foi demasiado deixando este de servir como elemento protector aos acontecimentos negativos mencionados.

A utilização da técnica de pré-corte, funciona como minimização das velocidades de vibração. Esta técnica consiste na criação de uma descontinuidade física no maciço rochoso entre o local de detonação e a estrutura a proteger. Esta descontinuidade funciona como uma barreira preenchida por água ou ar, que limita a propagação das ondas sísmicas.



Figura 13 – Exemplo de um pré-corte (Albino Inácio – Castelo Bom, 2007)

A teoria do pré-corte baseia-se no isolamento da área de desmonte do restante maciço remanescente, através da formação de uma fractura artificial ao longo do plano de escavação. Teoricamente quando as ondas de choque resultantes da detonação simultânea dos furos de pré-

corte colidem entre si, origina-se uma tensão na rocha que irá formar uma fractura entre furos sucessivos. Por isso, é importante a detonação simultânea das cargas de pré-corte ou com a menor variação de tempo possível (Olofsson, 1997).

O pré-corte cria um plano artificial ao longo dos limites da escavação, onde vai fracturar o resto da área de desmonte resultando numa parede bem definida sem sobre fracturação do maciço. Algumas das ondas de choque oriundas da pega principal são reflectidas contra ao plano criado pelo pré-corte, evitando assim que estas sejam transmitidas para o maciço remanescente, reduzindo então as vibrações (Olofsson, 1997).

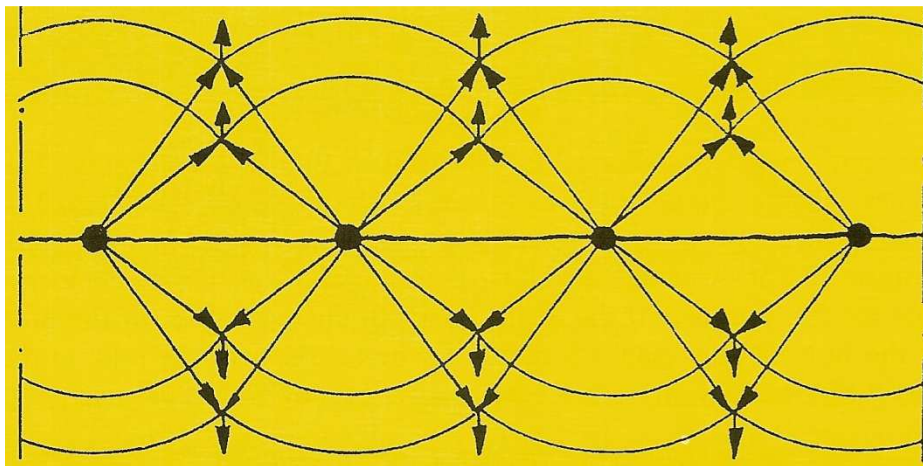


Figura 14 – Esquemática da teoria do pré-corte (Olofsson, 1997)

Existem ainda outras técnicas de minimização das vibrações, que estão directamente relacionadas com as restantes etapas do desmonte podendo mesmo influenciar bastante o resultado final da escavação. São exemplo disso a redução do tamponamento, que quanto mais elevado será, maior o confinamento da carga explosiva e com isso originar maiores vibrações induzidas ao terreno.

Segundo Olofsson, o valor das vibrações depende de:

- Número de cargas operantes;
- Características da rocha;
- Existência de frente(s) livre(s);
- Distância entre a zona de detonação e ponto de observação;
- A geologia da rocha circundante.

A redução da sub-furação evita que se furem comprimentos superiores ao necessário, logo o explosivo que detona nesse comprimento extra contribui para a geração de uma maior energia a ser convertida em vibrações.

Evitando a iniciação no fundo do furo reduz-se normalmente os níveis de vibração, mas por outro lado mantêm a integridade de todo o tamponamento. (Hagan & Kennedy, 1977; citado por Pereira, 2001).

A utilização de explosivos com menores densidades e velocidades de detonação devido à proporcionalidade existente entre as tensões induzidas no terreno pela pressão de detonação e a velocidade das partículas, providenciam menores vibrações no maciço.

A metodologia que deverá ser utilizada como forma de diminuir os impactes negativos causados pelas vibrações consiste na previsão das amplitudes sísmicas nas estruturas a proteger circundantes à zona de detonação, considerando as propriedades geomecânicas dos maciços rochosos e parâmetros do diagrama de fogo (Dinis da Gama, 2000).

Através do estudo de equações conclui-se que para cargas semelhantes, detonadas à mesma distância, as formações geológicas mais atenuadoras da amplitude das ondas, originam velocidades de vibração maiores do que as formações menos dissipadoras da energia vibratória. Ao que parece uma contradição explica-se facilmente por as litologias mais atenuadoras possuírem menores valores de impedância, o que origina o desaparecimento mais rapidamente das vibrações.

Existem diferentes parâmetros que alteram o valor final das velocidades de vibração resultantes da aplicação de explosivo.

A alteração do volume desmontado por pega, dos parâmetros geométricos do diagrama de fogo, do tipo de explosivo e dos sistemas de iniciação interferem directamente com o valor da velocidade de vibração. Logo a interacção destas componentes funcionam como estratégia válida para otimizar a controlar as vibrações provocadas pelos desmontes.

O dimensionamento dos diagramas de fogo são executados com a utilização de diversificadas fórmulas que alteram os parâmetros geométricos das pegas e são baseadas em relações meramente empíricas. Estas fórmulas têm como grande inconveniente abstraírem e abreviarem um enorme número de variáveis que influenciam o desmonte.

As causas mais comuns de desvio nas vibrações atingidas estão relacionadas com:

- Utilização de equipamentos mal dimensionados ou em simultâneo;
- Desrespeito do horário de trabalho estipulado para a detonação;
- Plano de fogo inapropriado para o projecto.

A inclinação do furo influencia, em certo modo a quantidade de vibração gerada. A zona de constrição da rocha deverá ser menor com a maior inclinação dos furos. Ao inclinar os furos, a energia da onda choque vai ser melhor aproveitada. O ângulo de quebra torna-se tal que as ondas de choque reflectem contra a face livre. Se os furos estivessem a prumo, grande quantidade da energia da onda de choque iria para a rocha, sem ser reflectida e aumentando a vibração ao maciço (Olofsson, 1997). Esta facto pode ser observado na figura abaixo.

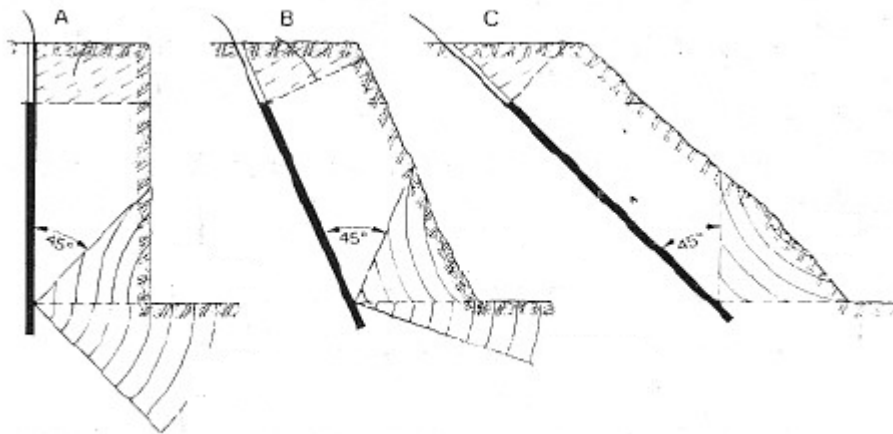


Figura 15 – Importância da inclinação dos furos (Jimeno et al 1995)

Qualquer condição que aumente o confinamento da detonação aumenta consideravelmente o valor da vibração. Este valor aumenta igualmente em situações onde a pega de fogo falha em fragmentar a rocha até determinado nível, originando um volume de rocha por fragmentar que irá servir de confinamento da detonação (Olofsson, 1997).

O confinamento das cargas vão provocar um maior nível de vibrações do que aquelas que estão com a adequada frente livre.

Uma má precisão de perfuração pode causar alguns problemas na altura do seu rebentamento, nomeadamente se apresentarem más inclinações originando maiores vibrações (Olofsson, 1997).

Qualquer metodologia utilizada para redução dos níveis de vibração implica imediatamente um aumento no custo da perfuração e detonação. Por essa razão, torna-se importante a realização de

inspecções prévias a todas as estruturas antes de efectuar qualquer trabalho de desmonte em áreas populadas. Estas inspecções deverão ser acompanhadas por um critério de análise de risco como forma de antever a sensibilidade das estruturas às vibrações (Olofsson, 1997).

Segundo o mesmo autor os parâmetros de análise mais importantes serão:

- A resistência à vibração dos materiais constituintes da estrutura;
- A condição da estrutura;
- Duração e carácter da vibração esperada;
- Presença de equipamento sensível a vibrações dentro da estrutura;
- Tipo de fundação;
- Qualidade da fundação;
- Velocidade de propagação das ondas sísmicas.

A seguinte tabela mostra alguns valores típicos utilizados na avaliação de possíveis danos das vibrações em edifícios correntes na Suécia, após mais de 40 anos de aquisição e interpretação de leituras sismográficas (Olofsson, 1997).

Tabela 1 – Velocidades limite de vibração recomendada nas fundações de edifícios (Olofsson, 1997)

Velocidades limite de vibração recomendadas nas fundações de edifícios				
Tipo de solo	areia, cascalho e argila	calcário	granito, gneiss, quartzito	Resultado nas estruturas
velocidade onda (m/s)	1000 - 1500	2000 - 3000	4500 - 6000	
Velocidade vibração (mm/s)	9	18	35	sem fissuramento visível
	13	25	50	
	18	35	70	
	30	55	100	pequenas fissuras
	40	80	150	fissuras bem visíveis
	60	115	225	fissuramento severo

4.1. Vibrações em desmontes aquáticos

Em desmonte subaquáticos, as vibrações são ainda mais imprevisíveis do que em desmontes normais devido ao maior risco de propagação entre os furos. Este factor torna a estimação das vibrações falível e não existe mesmo certeza se vai existir a propagação entre furos e qual a sua dimensão. Esta propagação entre furos, vai permitir que um maior número de cargas seja detonado no mesmo instante, provocando maiores vibrações (Olofsson, 1997).

Ondas de choque de água resultantes dos rebentamentos subaquáticos poderão causar problemas não só nas construções adjacentes tipo cais e marinas, como nos barcos e nas pessoas dentro de água. A pressão destas ondas de choque criada pela detonação de explosivos livremente na água, é consideravelmente mais elevada do que a detonação de explosivo confinado dentro do furo executado na rocha (Olofsson, 1997).

A onda de choque de água não apresenta tanto potencial de dano se a rocha for perfurada e o explosivo detonado na rocha. A duração desta onda de choque é curta, e o seu valor de pico reduzido para metade no espaço de milissegundos. Isto, implica que a sobreposição de diferentes cargas de tempos diferentes não ocorra (Olofsson, 1997).



Figura 16 – Pormenor de um rebentamento subaquático (Dyno Nobel, 2006)

Foram sugeridas medidas diferentes para reduzir a pressão deste tipo de ondas. Um exemplo disso é o método da cortina de bolhas de ar, que consiste numa cortina produzida através de uns tubos perfurados e colocados no fundo que são atravessados por ar comprimido criando em contacto com a água as bolhas de ar. Quando a onda de choque atinge a cortina de bolhas de ar, parte dela vai ser absorvida nas bolhas. A parte da onda que ainda atravessa a cortina pelo meio das bolhas, terá um valor de pico mais reduzido e uma atenuação mais rápida que a habitual sem nenhum efeito de amortecimento (Olofsson, 1997).

O método mais eficaz de reduzir a pressão e impulso da onda de choque de água é o de reduzir as cargas por tempo e confina-las muito bem na rocha (Olofsson, 1997).

SISMÓGRAFOS

5. Sismógrafos

Foram desenvolvidos diferentes tipos de instrumentos para medir as vibrações no terreno.

Os primeiros equipamentos inventados, eram de carácter mecânico. Estes eram fixos ao objecto que estava sujeito às vibrações. O instrumento continha um peso suspenso num fio, actuando como uma massa inerte. Durante a vibração o instrumento move-se e o peso não, este movimento será registado em papel e através dele calculado o nível de vibração no terreno. Estes equipamentos hoje em dia foram substituídos por electrónicos (Olofsson, 1997).

Nos aparelhos electrónicos, a vibração mecânica é sentida e traduzida em sinal eléctrico por um transdutor electro dinâmico, o geofone. Este transdutor resume um sinal eléctrico directamente proporcional à velocidade de vibração das partículas. Eles são capazes de medir as componentes verticais, horizontais e transversais (Olofsson, 1997).

O Sismógrafo é um equipamento utilizado para monitorizar as vibrações. Vem equipado com um ou vários geofones de carácter triortogonal. Deve ser devidamente certificado e calibrado, e possuir capacidade de armazenar os registos efectuados e transferi-los directamente para papel ou para um computador.



Figura 17 – Sismógrafo Instantel Minimater Blaster (retirado do site Instantel)

A obtenção dos dados para a posterior postulação da lei de atenuação do local, é efectuado por sismógrafos, dotados de geofones, colocados no terreno à distância pretendida do local de desmonte.

Em cada detonação os geofones captam os impulsos sísmicos, em diferentes instantes e registam-nos caso estes sejam superiores aos limites de detecção do equipamento (sensibilidade do geofone) e ao valor mínimo de activação (trigger) do sismógrafo.

A prática é medir as três direcções: vertical, longitudinal e transversal. Normalmente a direcção dominante a curtas distâncias é a vertical (Olofsson, 1998).

Os geofones transformam a energia mecânica da vibração, em energia eléctrica, com intensidade proporcional ao movimento oscilatório do solo. Eles processam o registo das vibrações discriminando as diferentes componentes radiais, transversal e vertical das ondas (L,T, V).

O aparelho apresenta como resumo os valores relativos às velocidades vibratórias de pico nas três direcções acima definidas, assim como a sua resultante vectorial que caracteriza o máximo de valor de velocidade atingido naquele local de monitorização.

A resultante vectorial (PVS) resulta do cálculo do vector correspondente às três direcções no mesmo instante de tempo:

$$PVS = \sqrt{Vl^2(t) + Vv^2(t) + Vt^2(t)} \quad (5.1)$$

Segundo Downing (1992) é frequente que a PVS ocorra no instante de tempo onde se verifica a maior das três componentes.

Os dados registados são processados de forma a calcular o valor da resultante das velocidades de partículas medidas nas três componentes do espaço (Dinis da Gama, 1997).

Os aparelhos utilizados hoje em dia permitem obter informações relativas aos valores da velocidade vibratória de pico (PPV – peak particle velocity) segundo três componentes ortogonais: longitudinal, transversal e vertical, calculando assim a sua resultante vectorial (PVS – peak velocity sum), que é o valor máximo utilizado das vibrações obtidas naquele ponto de monitorização. O sismograma inclui também as frequências, medidas nos instantes de tempo em que se verificam as amplitudes máximas.

Notes

Location:

Client:

User Name:

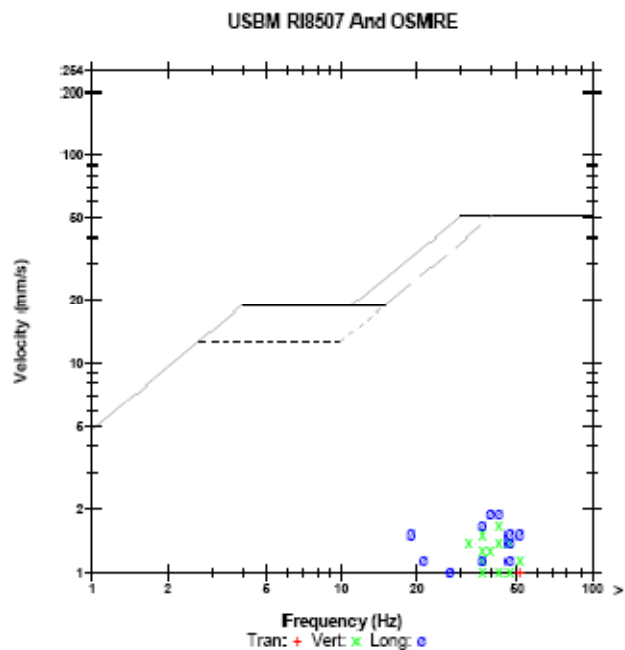
General:

Extended Notes

Post Event Notes

Microphone Linear Weighting
 PSPL <0.500 pa.(L) at -0.182 sec
 ZC Freq N/A
 Channel Test Check (Freq = 0.0 Hz Amp = 0 mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	1.02	1.85	1.90	mm/s
PPV (Ponderated)	0.978	1.41	1.58	mm/s
PPV	51.1	55.4	56.8	dB
ZC Freq	61	43	39	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.370	0.271	0.263	sec
Peak Acceleration	0.0398	0.0530	0.0663	g
Peak Displacement	0.00614	0.00670	0.0124	mm
Sensorcheck	Check	Passed	Passed	
Frequency	7.8	7.4	7.2	Hz
Overswing Ratio	3.8	3.9	3.9	



Peak Vector Sum 2.16 mm/s at 0.272 sec

N/A: Not Applicable

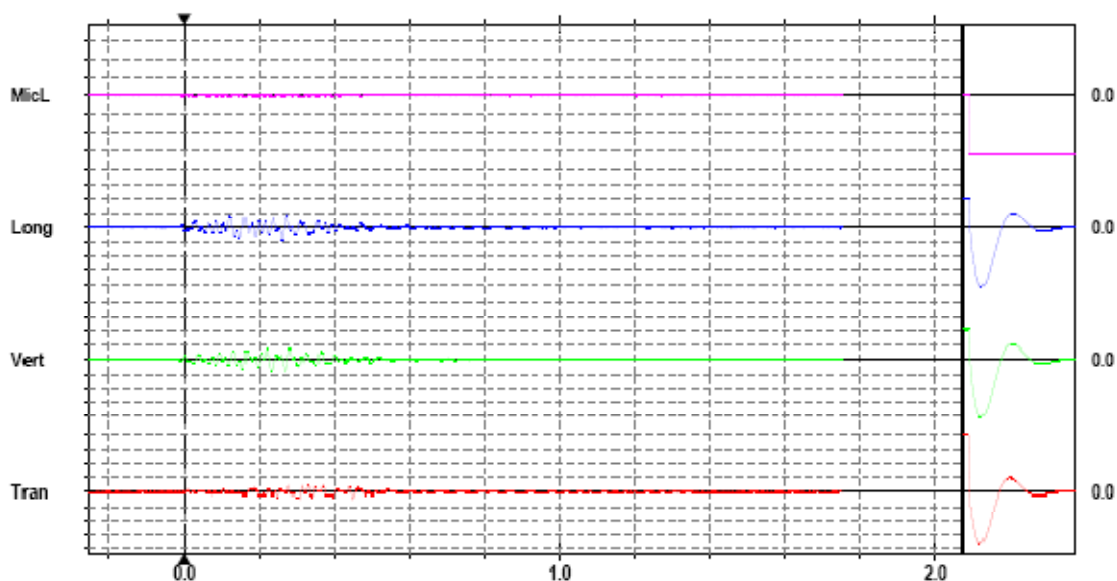


Figura 18 – Exemplo de um registo de vibração de um sismógrafo

LEGISLAÇÃO

6. Legislação

Existe no nosso país várias ferramentas legais que controlam os impactes ambientais, inerentes às escavações com recurso a explosivos. Elas são nomeadamente, a Lei do Ruído (Decreto-Lei n.º 292/200, de 14 de Novembro) e a Norma Portuguesa (NP 2074), com o nome de “Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares”, de 1983 aprovada pela Secretaria de Estado de Energia. Esta define os limites dos efeitos nocivos que as vibrações podem originar em estruturas circundantes aos trabalhos de desmonte com explosivos (Bernardo, 2004).

O controlo de vibrações no nosso país é efectuado pelo cumprimento da Norma Portuguesa NP 2074 supra citada, que vigora desde 1983 e estabelece de modo bastante conservador os limites de vibração aceitáveis em função, do tipo de construção e de terreno de fundação (Dinis da Gama, 2003).

Esta Norma estabelece o valor limite para a velocidade da vibração de pico (VL), como resultante do produto de três factores: tipo de fundação (α), tipo de construção (β) e número de solicitações diárias (γ).

$$VL = \alpha.\beta.\gamma. 10^{-2} [m.s^{-1}] \quad (6.1)$$

A tabela 2 traduz os valores estimados para as diferentes situações presentes.

Tabela 2 – Resumo da NP 2074

TIPO DE TERRENO (α)	TIPO DE CONSTRUÇÃO (β)	Nº médio de solicitações diárias (γ)	Valores Limite (mm/s)
Solos incoerentes, soltos, areias e misturas areia-seixo, solos coerentes moles e muito moles. $v < 1000 \text{ m/s}$ $\alpha = 0,5$	Construções que exigem cuidados especiais : Monumentos e outro património histórico sensível, hospitais, habitações antigas, centro históricos, depósitos de água e chaminés em alvenaria, etc. $\beta = 0,5$	$\leq 3 \text{ (1,0)}$	2,5
		$> 3 \text{ (0,7)}$	1,8
	Construções correntes , como edifícios de habitação em alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc. $\beta = 1,0$	$\leq 3 \text{ (1,0)}$	5,0
		$> 3 \text{ (0,7)}$	10,5
	Construções reforçadas , como edifícios com estrutura de betão armado, edifícios industriais de construção recente, etc. $\beta = 3,0$	$\leq 3 \text{ (1,0)}$	15,0
		$> 3 \text{ (0,7)}$	10,5
Solos coerentes, solos incoerentes compactos, areias e misturas areia-seixo uniformes e bem graduadas. $1000 \text{ m/s} < v < 2000 \text{ m/s}$ $\alpha = 1,0$	Construções que exigem cuidados especiais : Monumentos e outro património histórico sensível, hospitais, habitações antigas, centro históricos, depósitos de água e chaminés em alvenaria, etc. $\beta = 0,5$	$\leq 3 \text{ (1,0)}$	5,0
		$> 3 \text{ (0,7)}$	3,5
	Construções correntes , como edifícios de habitação em alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc. $\beta = 1,0$	$\leq 3 \text{ (1,0)}$	10,0
		$> 3 \text{ (0,7)}$	21,0
	Construções reforçadas , como edifícios com estrutura de betão armado, edifícios industriais de construção recente, etc. $\beta = 3,0$	$\leq 3 \text{ (1,0)}$	30,0
		$> 3 \text{ (0,7)}$	21,0
Rocha e solos coerentes rijos $v < 2000 \text{ m/s}$ $\alpha = 2,0$	Construções que exigem cuidados especiais : Monumentos e outros património histórico sensível, hospitais, habitações antigas, centro históricos, depósitos de água e chaminés em alvenaria, etc. $\beta = 0,5$	$\leq 3 \text{ (1,0)}$	10,0
		$> 3 \text{ (0,7)}$	7,0
	Construções correntes , como edifícios de habitação em alvenaria, edifícios industriais menos recentes, etc. $\beta = 1,0$	$\leq 3 \text{ (1,0)}$	20,0
		$> 3 \text{ (0,7)}$	14,0
	Construções reforçadas , como edifícios com estrutura de betão armado, edifícios industriais de construção recente, etc. $\beta = 3,0$	$\leq 3 \text{ (1,0)}$	60,0
		$> 3 \text{ (0,7)}$	42,0

A Norma Portuguesa distingue-se das restantes normas, por envolver os parâmetros supracitados.

Analisando a tabela resumo, conclui-se que o valor máximo admissível será de 60 mm/s, apresentando um factor de segurança muito elevado apenas justificável para a prevenção do aparecimento de danos cosméticos nas estruturas. O estabelecimento dos valores limites poderá estar envolto em alguma subjectividade no que toca ao estabelecimento dos parâmetros de tipo de construção da estrutura (Bernardo, 2004).

A Norma apresenta como grande lacuna, a ausência do parâmetro frequência ondulatória, sendo este um factor muito importante na avaliação dos danos (Dinis da Gama, 1998).

Esta como envolve as características do terreno em qual as estruturas estão fundadas não é justa porque os valores de vibração devem ser medidos sobre um elemento da fundação da estrutura, e isso já pressupõe os efeitos que o terreno impõe na propagação das ondas (Bernardo, 2004).

Conhecendo-se os limites a respeitar, estipulados pela Norma, é necessário determinar a lei de propagação das vibrações em cada local a analisar, de modo a poder estabelecer parâmetros do plano de fogo como a carga máxima utilizada por retardo.

Uma vez que os parâmetros envolvidos nas propagações ondulatórias são de elevada variabilidade e complexidade, geralmente procuram-se quantificar os critérios a partir de dados experimentais.

Em alguns países da União Europeia, existe legislação que obriga a que a primeira fiada de um desmonte em bancada seja alvo de estudos por Boretrack e Laser Profile de forma a minimizar o risco de projecções e vibrações induzidas ao maciço. Estes estudos englobam um varrimento da frente da bancada que mede o comprimento da frente, ângulo, pé e altura da bancada, aliado com a medição por uma sonda em cada furo (Olofsson, 1997).

IMPACTO AMBIENTAL

7. Impacto Ambiental

A definição de impacto ambiental surge no Decreto-Lei n.º 69/2000, de 3 de Maio e define-o como um conjunto de alterações produzidas em parâmetros ambientais e sociais, num determinado período de tempo e numa determinada área, resultantes da realização de um projecto e comparada no mesmo período de tempo com a situação que ocorreria sem a execução do mesmo projecto (Bernardo, 2004).

Este fenómeno da detonação de explosivos origina no seu raio de acção, perturbações humanas e danos em estruturas e equipamentos.

Dos efeitos negativos criados pelo uso de explosivos, os mais importantes são: vibrações transmitidas aos terrenos e estruturas, ondas de choque, projecção de blocos de rocha, criação de poeiras e sobrefacturação do maciço rochoso remanescente (Dinis da Gama, 2003).

Os impactos ambientais são por ordem crescente de influência: Instabilidade do restante maciço, projecções de fragmentos, produção de poeiras, ruído e vibrações.

Cada um destes efeitos secundários indesejáveis, é susceptível de redução ou eliminação através de uma análise e aplicação rigorosa dos parâmetros constituintes dos diagramas de fogo (Dinis da Gama, 2000).

Os movimentos que se desenvolvem nas estruturas como resposta aos movimentos do terreno, dependem de vários factores como, a quantidade de energia libertada, a distância entre a origem e a estrutura, as propriedades de transmissão e dissipação do terreno e a própria resistência da estrutura.

As vibrações transmitidas aos terrenos, são as grandes responsáveis pelo dano causados nas estruturas circundantes ao desmonte. Estas constituem a causa mais comum de preocupação e protesto, por parte das pessoas afectadas nas proximidades dos trabalhos (Dinis da Gama, 2000). Estes efeitos contínuos do quotidiano, podem provocar degradação ambiental e incómodo causando danos em estruturas e queixas.

As vibrações inerentes ao quotidiano do ser humano são caracterizadas por maiores amplitudes do que as causadas pela escavação de maciços rochosos com explosivos. Apesar disso, sabendo que o ser humano é tolerante às vibrações do dia-a-dia, ele mostra-se bastante inconformado com as vibrações causadas por detonações uma vez que não existe habituação.

Geralmente os moradores responsabilizam as vibrações pelas fendas que encontram em suas casas, as quais muitas vezes poderão ter origem no simples assentamento diferencial das fundações ou na retracção das argamassas.

Frequentemente a errada avaliação de danos estruturais está relacionada com o choque e ansiedade gerados pelas vibrações, impelindo os proprietários a procurar danos e a reclamarem.

A interacção do técnico presente no local com as populações, promove positivamente o esclarecimento a estas da importância da obra e explicando o tipo de monitorização a executar favorecem o contacto directo com os lesados.

Pode-se dizer que os danos em estruturas apenas acontecem quando os impulsos dinâmicos causados pelas detonações se sobrepõem aos impulsos estáticos alterando as condições de resistência da estrutura (Eston, 2003).

As estruturas podem ser danificadas pelas vibrações provenientes de desmontes mas também de outras causas que à primeira vista poderão parecer inofensivas, mas que contribuem também para a degradação e agravamento dos danos existentes. Nessas outras causas salienta-se o tráfego rodoviário e ferroviário, que provocam velocidades de vibração da mesma ordem de grandeza das resultantes de detonações. A própria actividade que se desenvolve no interior das estruturas pode ser suficiente para apresentar vibrações elevadas (bombagem de água, geração de energia, etc.) (Bernardo, 2004).

Além da detonação de explosivos, outros factores podem provocar a dita resposta elástica do terreno, como por exemplo os sismos, o deslizamento de massas rochosas ao longo de acidentes geológicos, a cravação de estacas, a demolição de edifícios, a utilização de diversos equipamentos e de veículos motorizados. A consideração destes efeitos sugere uma acumulação de fontes que provocarão o aumento dos impactes.

As estruturas formadas por materiais de maior impedância, como por exemplo betão, sofrem maiores danos cosméticos pois transmitem melhor a solicitação, do que estruturas formadas por outro tipo de materiais de baixa impedância como por exemplo a madeira.

Muitas das alterações estruturais existentes passam despercebidas até existir um fenómeno externo que facilmente possa explicar os danos existentes e constituir a solução cómoda de obtenção de indemnizações.

Quando a necessidade de proteger o ambiente de determinado efeito secundário mais dominante e crítico, esta protecção deverá sobrepor-se aos requisitos de protecção impostos pelos restantes

impactes ambientais. O principal objectivo resume-se a pesquisar o processo mais eficaz a nível de protecção ambiental sendo ao mesmo tempo o mais económico. Para isso, deve-se eliminar as soluções inviáveis e analisar criteriosamente as várias alternativas possíveis disponíveis para minimizar o impacte negativo (Dinis da Gama, 2000).

Apenas 5 % a 15 % da energia libertada pela detonação de explosivos é utilizada efectivamente na fragmentação do maciço. Significa portanto, que a restante e maior parte da energia produzida é transferida para o ambiente circundante sob a forma de calor, ruído e vibrações (Dinis da Gama, 2000).

Segundo Dinis da Gama os impactes ambientais associados a esta actividade conseguem ser facilmente ser controlados quando possui a seguinte informação adicional do local a intervir:

- Característica do maciço;
- Geologia dos terrenos de fundação das estruturas circundantes;
- Conhecimento exacto da distância entre ponto de detonação e monitorização;
- Carga de explosivo aplicada por tempo;
- Grau de confinamento da carga explosiva.

Os efeitos das vibrações nas estruturas podem ser descritos em termos de deslocamentos permanentes e transitórios das suas partículas constituintes (Dowding, 1992). Estes efeitos atingem o carácter permanente quando são constituídos principalmente por degradações da integridade da estrutura e deslocamentos efectivos que originam deformações não recuperáveis de partes da estrutura ou maciço. Estes deslocamentos de partículas que são causados pelas vibrações dependem directamente da rede de fracturação pré-existente que pode promover o processo.

Os efeitos de carácter transitório resultam directamente da natureza da vibração e traduzem-se sob a forma de propagação de ondas no terreno e da onda aérea. Neste tipo de efeitos as partículas após a passagem da onda retomam à sua posição inicial.

Os impactes ambientais resultantes do uso de explosivos, são fenómenos explicáveis, mensuráveis e controláveis, podendo acontecer sem atingirem os limites oficialmente obtidos. Quando estes limites são ultrapassados, a operação foi incorrectamente dimensionada ou executada (Dinis da Gama, 1998).

PLANEAMENTO DO PROJECTO

8. Planeamento do projecto

Antes da execução de cada projecto torna-se necessário escolher o método de escavação, tomando em consideração factores de ordem técnica e ambiental.

Por isso, o perfeito conhecimento das propriedades mecânicas e geotécnicas dos maciços presentes no projecto fornecem informações preciosas para a escolha e dimensionamento do método de escavação.

As propriedades geotécnicas são as mais condicionantes do desenvolvimento da escavação, como por exemplo características como a estrutura geológica, permeabilidade, estados de tensão na cota dos trabalhos, entre outras. Estes parâmetros além de condicionarem o método de escavação também o fazem em relação à utilização de sistemas de estabilização provisórios ou definitivos (Bastos, 1998).

O método de escavação seleccionado está directamente relacionado com a escavabilidade do maciço. Este parâmetro deverá ter influência na utilização ou não de explosivos e na técnica de desmonte a aplicar.

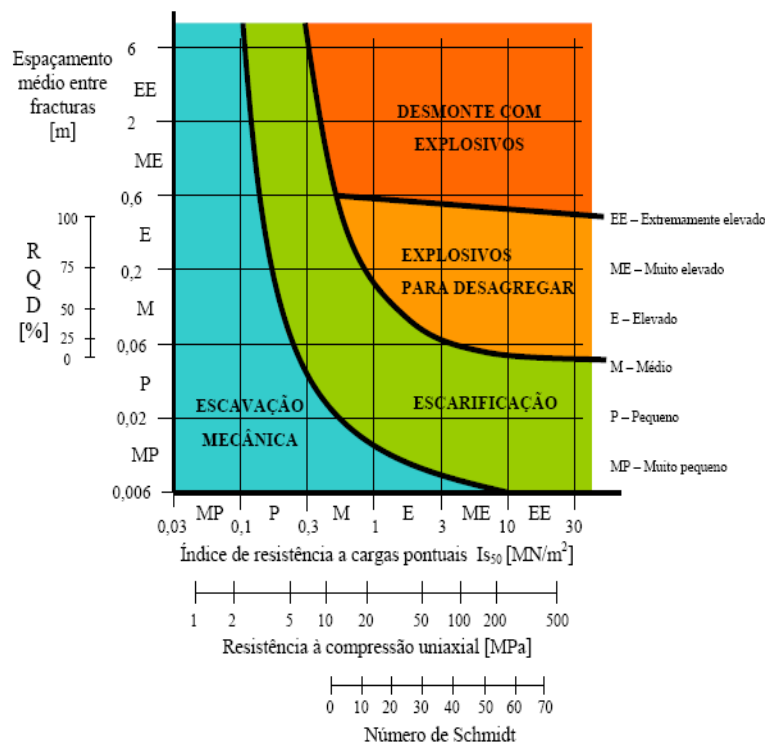


Figura 19 – Classificação da escavabilidade de maciços rochosos, segundo Franklin et al. 1971 (modificado por Bastos, 1998)

A utilização de explosivos numa obra promove a acção benéfica de permitir de forma económica a escavação do maciço, e a acção prejudicial de provocar impactes ambientais negativos.

Para a escolha do tipo de desmonte a realizar numa escavação, pode-se estudar o RMR (Rock Mass Rating) existente do local.

Bieniawski em 1989 caracterizou o RMR com base nos seguintes parâmetros:

- RQD (Rock Quality Designation);
- Espaçamento entre descontinuidades;
- Qualidade das descontinuidades;
- Resistência à compressão da rocha;
- Presença de água;
- Orientação das descontinuidades em relação ao avanço da escavação.

Bieniawski publicou uma versão mais robusta desta classificação em 1989 após uma vasta experiência recolhida em obras subterrâneas. Esta classificação geomecânica é baseada no princípio da atribuição de pesos aos seis parâmetros supracitados e que contribuirão mais significativamente para o comportamento dos maciços rochosos. O somatório destes pesos atribuídos a cada um destes parâmetros constitui um índice, usualmente designado por RMR, ao qual corresponde uma das cinco classes de qualidade de maciços, consideradas pelo autor.

Tabela 3 – Classificação de Beiniawski (Beiniawski, 1989)

Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha Intacta	Carga Pontual	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Ver compressão uniaxial		
		Compressão uniaxial	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Pesos		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90-100 %	75-90 %	50-75 %	25-50 %	< 25 %		
	Pesos		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 2m	0,6 -2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Pesos		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfície rugosa não contínua, sem separação, paredes não alteradas	Superfície ligeiramente e rugosa, separação < 1mm, paredes alteradas	Superfície ligeiramente rugosa, separação < 1mm, paredes muito alteradas	Superfície polida enchimento espessura < 5 mm ou juntas com separação 1-5 mm	Enchimento mole com espessuras > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm		
	Pesos								
			30	25	20	10	0		
5	Presença de água	Caudal por 10 m do túnel	nenhum	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min		
		Relação pressão vs tensão principal máx	0	< 0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Condições gerais	seco	Água intersticial	Húmido	Escorrimen s	Entrada de água		
	Pesos		15	10	7	4	0		

Com a aplicação desta classificação pode-se conseguir determinar que o maciço ou zonas dele poderão ser alvo de desmonte mecânico e evitar o uso de explosivos. De salientar que esta classificação é largamente utilizada em trabalhos subterrâneos como escolha do tipo de desmonte a efectuar, parâmetros do plano de fogo e parâmetros de sustimento.

Actualmente, o binómio investigação e desenvolvimento permitiram o aparecimento de novas substâncias explosivas. Este factor associado ao aperfeiçoamento das técnicas de escavação obriga a uma escolha flexível mas criteriosa da técnica de execução da escavação. Por isso, deverá conhecer-se as propriedades dos diferentes tipos de explosivo disponíveis e as capacidades dos meios necessários para a execução da técnica pretendida para a escavação.

Deve ser ainda tomada em especial atenção as regras e limites legais existentes para o uso de explosivos em projectos.

O objectivo da escolha deverá ser a melhor concepção técnica, ambiental e económica.

No processo de selecção de um explosivo tem influência as seguintes variáveis: factores económicos, características do maciço rochoso, tipo de explosivo, resultados pretendidos e as restrições ambientais existentes.

O explosivo escolhido deverá ser o que resulte no melhor encontro de impedâncias entre explosivo e maciço de modo a tirar o máximo partido da energia do produto explosivo aplicado.

LEI DE PROPAGAÇÃO SÍSMICA

9. Lei de propagação sísmica

Os métodos utilizados para determinar as leis de propagação sísmica foram evoluindo ao longo do tempo.

Inicialmente em 1927, Rockwell considerou que o factor que melhor descrevia como uma estrutura resistia às vibrações era o deslocamento das partículas nessa estrutura. (Dinis da Gama, 1971). Em 1950, Morris propôs a primeira lei de atenuação ondulatória, admitindo que:

$$\lambda = K \frac{\sqrt{Q}}{D} \quad (9.1)$$

Com λ , amplitude do referido deslocamento, proporcional à raiz quadrada do peso da carga detonada (Q) e inversamente proporcional à distância ao local da detonação (D). Esta equação considerava uma constante adimensional (K) que dependia do tipo de solo presente (Bernardo 2004).

Investigações posteriores feitas por Blair & Duvall em 1954, Duvall & Petkof em 1959 e Devine & Duvall em 1963, apontaram a mesma equação com uma alteração que a permitia aplicar na detonação de cargas cilíndricas, com a introdução de outra constante adimensional (Jimeno e tal., 1995).

$$v = K \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^n \quad (9.2)$$

Tendo esta expressão como base o USBM estabeleceu um critério de dano, que se considera harmonizado na ausência de instrumentação de registo de vibrações, considerando a distância de segurança (Ds), relacionada com a raiz quadrada da carga de explosivo por retardo em Kg(Q).

$$Ds \geq 22,5 \sqrt{Q} \quad (9.3)$$

Vários autores como por exemplo (Dinis da Gama & Bernardo, 2001; Jimeno e tal., 1995; Hustrulid, 1999) reconhecem a equação mais usada para definir a lei de atenuação das vibrações nos terrenos a criada por Johnson (1971), que descreve a velocidade vibratória resultante como relação entre a distância e a carga de explosivo por retardo com a introdução de três variáveis a, b e c adimensionais e dependentes das características dos locais e do tipo de desmonte.

Com os registos obtidos no campo, pode-se estabelecer por regressão linear múltipla diferentes relações entre as constantes, sendo aceite a equação que apresentar melhor coeficiente de

correlação. Esta equação será a eleita como lei que caracteriza a atenuação característica daquele local onde se efectuaram os registos.

De salientar a importância da duração temporal do registo de vibração que deverá ser alargada de forma a conseguir detectar os picos de maior amplitude. À medida que aumenta a distância entre o ponto de detonação e o de observação, dá-se uma atenuação selectiva de frequências que acontece simultaneamente com a dispersão das velocidades. Isto vai originar uma sobreposição das ondas de vibração provenientes de cada retardo, devido às reflexões e refacções que favorecem tempos de chegada e percursos diferentes.

Portanto, na prática um correcto dimensionamento temporal deverá conhecer o intervalo mínimo entre duas cargas consecutivas de forma a diminuir a amplitude da onda final.

A execução dos diagramas de fogo experimentais para definir a lei de atenuação e correspondente carga máxima a utilizar, deverão ser o mais aproximado possível dos diagramas que irão ser utilizados na escavação nesse mesmo local, uma vez que os resultados atingidos serão apenas válidos nesse contexto geológico.

Os estudos de determinação das equações de atenuação, vão ser meios de grande utilidade no correcto dimensionamento das pegadas de fogo e consequente prevenção de impactes ambientais. A análise destas equações permitem verificar que a quantidade de carga explosiva utilizada é directamente proporcional à velocidade de vibração expectável.

Segundo Dinis da Gama, na prática, a amplitude de vibrações expressa em velocidade de partícula, depende fundamentalmente das grandezas peso da carga explosiva e distância entre pontos de detonação e observação, podendo ser traduzida matematicamente por:

$$V = a Q^b D^c \quad (9.4)$$

Em que V é a amplitude máxima da velocidade de partícula, Q o peso do explosivo detonado por retardo e D a distância entre ponto de detonação e registo. Os parâmetros a, b e c são constantes dependentes do local, diagrama de fogo e propagação das ondas.

Na prática efectuando $c = 2b$, obtém-se a seguinte expressão:

$$V = a \left(\frac{Q}{D^2} \right)^b \quad (9.5)$$

Comparando esta relação empírica com a seguinte fórmula que define a lei de propagação teórica:

$$V = a\left(\frac{Q}{D^3}\right)^b \quad (9.6)$$

Alguns especialistas concordam em diminuir o expoente de D (3 para 2), face à modificação das características de atenuação da onda, quando passa de uma forma instável para uma forma elástica estável a distâncias mais longínquas da zona de detonação. Logo considera-se a fórmula supracitada a mais válida para zonas circundantes às explosões (Dinis da Gama, 1997).

Segundo Dinis da Gama, a experiência de dados recolhidos pelo U.S. Bureau of Mines, em Inglaterra, na Suécia e no Canadá, demonstra que a lei empírica de propagação de ondas sísmicas é baseada essencialmente na detonação de cargas cilíndricas, implicando portanto uma lei quadrática na atenuação.

Esta lei poderá representar-se graficamente através do pontos correspondentes aos registos dos sismógrafos, sobre diagramas que relacionam a velocidade de vibração com a distância atravessada $(D/Q)^{1/2}$. A regressão linear efectuada nos pontos de registo reproduz a lei empírica acima descrita uma vez que:

$$V = a\left(\frac{D}{Q^2}\right)^b = a\left(Q^{\frac{1}{2}}\right)^{-2b} \quad (9.7)$$

Estes diagramas tornam-se bastante úteis quando definidos em função da carga detonada por retardo de tempo. Pode observar-se que à medida que a distância aumenta, tem lugar uma atenuação selectiva de frequências coincidente com dispersão de velocidades que origina uma sobreposição de ondas provenientes dos diferentes retardos, não permitindo a individualização das ondas (Dinis da Gama, 2003).

Habitualmente para distâncias superiores a 1000 metros a lei de propagação das velocidades é estabelecida através da carga total da pega de fogo, para distâncias inferiores a essa utiliza-se a equação das ondas provenientes por detonação por retardo (Dinis da Gama, 2003).

A amplitude da velocidade da partícula é função apenas da quantidade de carga considerada e da distância, mantendo-se constante o tipo de formação geológica presente (Dinis da Gama, 2003).

Conhecendo o valor da amplitude da velocidade de partícula, pode-se prever o risco de dano na estabilidade de estruturas próximas da área de intervenção, através do uso de relações empíricas entre a grandeza das vibrações e os danos físicos por estas criadas. Operando estas relações em sentido inverso, obtemos a carga máxima que podemos executar num desmorte, protegendo ao máximo as estruturas circundantes de vibrações excessivas (Dinis da Gama, 2003).

Na ausência de medições utilizando cargas teste deve-se recorrer a dados do local existente em bibliografia para maciços rochosos iguais ou similares ao apresentado. Pode-se recorrer a uma equação de velocidade de vibração vs. Carga e distância para maciços do tipo presente no local a escavar (Dinis da Gama, 2006).

9.1. Critérios de Danos

Os efeitos provocados pelas vibrações agrupam-se nos seguintes grupos de ordem crescente de dano:

- Alteração do estado de funcionamento normal de equipamentos;
- Incómodo nas pessoas;
- Danos permanentes nas estruturas.

Uma vez que a velocidade da partícula é o melhor descritor da forma como as vibrações se propagam no maciço, este é o parâmetro comumente utilizado como critério de dano estrutural (Dinis da Gama, 2004).

Recentemente, tem-se desenvolvido critérios de danos que quantificam as vibrações em termos de tensões dinâmicas e as relacionam com as propriedades das estruturas.

Exemplo disso, é descrito por Dinis da Gama, é o critério de dano para estruturas próximas de desmontes utilizando explosivos que foi estabelecido pelo U.S. Bureau of Mines. Este critério conservador é utilizado nomeadamente quando não existe monitorização das vibrações e protege as estruturas contra os impactes negativos da detonação e pode enunciar-se da seguinte maneira:

$$D \leq 22,5 Q^{1/2} \quad (9.8)$$

Um bom critério de prevenção de dano será efectuar a medição de vibrações no maciço onde está a fundação da estrutura (Olofsson, 1997).

Patrício e Schiappa de Azevedo em 1997 para o LNEC estabeleceram um critério de admissibilidade baseado em registos de valores de velocidade de vibração expressos ou de valor máximo (PPV). Na base deste estudo analisaram vários registos de vibração nas fundações e diferentes pisos de estruturas. Para este fim foram consultadas as diferentes normas europeias assim como os critérios adoptados na ISO 2631.

Com base na NP 2074 e na revisão da mesma Norma com a introdução do parâmetro frequência dominante no espectro de velocidade estes autores propõem o seguinte critério de valores limites da velocidade eficaz da vibração na geração de danos nas estruturas.

Tabela 4 – Valores Limite de Velocidade Eficaz de vibração na geração de danos (Patrício, 1997)

v_{ef} (mm/s)	efeitos
$v_{ef} < 3,5$	praticamente nulos
$3,5 < v_{ef} < 7$	possibilidade de danos cosméticos em edifícios antigos
$7 < v_{ef} < 21$	fendilhação ligeira nos revestimentos
$21 < v_{ef} < 42$	fendilhação acentuada nos revestimentos e alvenarias
$42 < v_{ef}$	danos consideráveis; possível fendilhação da estrutura de betão armado

Existe uma certa concordância mundial após investigações empreendidas em diversos países, que correlaciona os danos estruturais com a amplitude das ondas sísmicas caracterizadas pela grandeza velocidade de vibração (Dinis da Gama, 1998).

Segundo certos estudos estatísticos, 97 % dos casos de dano real estão directamente relacionados com velocidades de vibração superiores a 71 mm/s. Aparentemente um limite superior de 50 mm/s garante a segurança de edifícios construídos com resistência normal (Berger, 1971 referido por Dinis da Gama, 1998).

Convém salientar que o limite de percepção humana é muito inferior aos níveis de vibração suportados por estruturas correntes. A faixa de sensibilidade do ser humano reside entre o 1 mm/s e o 50 mm/s (Dinis da Gama, 1998).

São definidos por vários autores diferentes limites de percepção humana, por exemplo Kiely (1999) diz que a percepção depende apenas da velocidade vibratória das partículas sendo o limiar igual a 0,3 mm/s. Já por sua vez, Bauer & Crsoby (1990), consideram a velocidade de vibração e a frequência como responsáveis pelo incómodo causado, sendo que à medida que a frequência decresce maior será o incómodo causado. Existe ainda uma faixa de autores que relacionam a afectação com a duração temporal do evento de vibração e a localização do indivíduo em relação ao ponto de origem do evento.

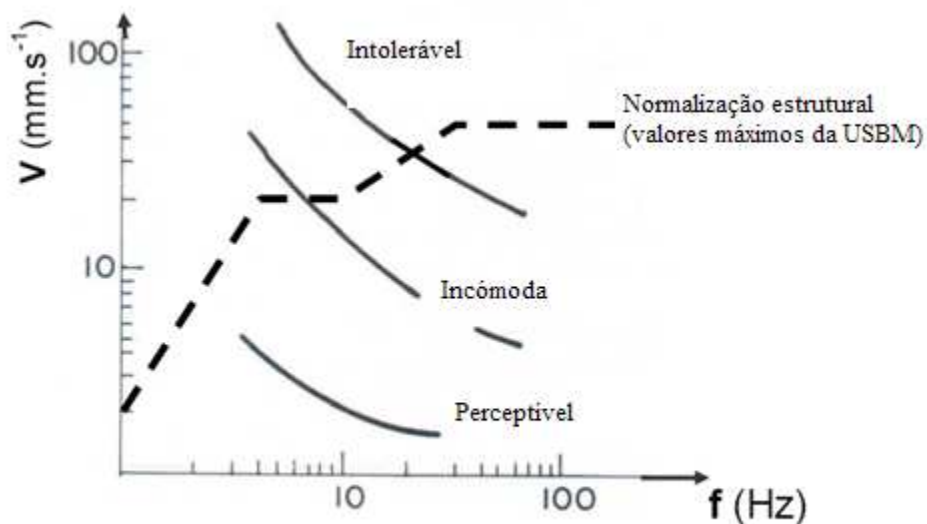


Figura 20 – Comparação da resposta humana à vibração mecânica (Goldman, 1948)

Analisando a figura de Goldman, a faixa de vibrações detectáveis pelo homem depende do binómio frequência e velocidade, concluindo-se que o incómodo causado pelas vibrações decresce com a frequência.

Em relação ao tipo de dano presente, o mais comum será o aparecimento em paredes construídas em tijolo rebocadas e estucadas, de fendas em forma de “x”. Estas devem-se ao movimento das bases da estrutura o que origina tensões de tracção que ao vencerem a resistência dos materiais origina este tipo de dano (Jimeno e tal, 1995).

9.2. Fórmula de Langefors e Johnson

Vários autores (Dinis da Gama, 1978; Jimeno et al, 1995; Hustrulid, 1999; etc.), reconhecem a equação mais usada para definir a lei de propagação das velocidades a que foi acima descrita denominada fórmula de Johnson.

$$V = a Q^b D^c \quad (9.9)$$

em que v é a velocidade vibratória de pico da partícula (mm/s), D é a distância entre os pontos de detonação e monitorização (m) e Q é o peso da carga explosiva detonada por retardo (kg). As constantes a , b e c são características do local e dos desmontes (Bernardo, 2004).

Conhecidos os valores da distância e o valor máximo de vibração admissível consegue-se calcular a carga máxima por retardo possível de aplicar. Para isto terá inicialmente de ter bem claro os valores das constantes ou defini-los através de regressões lineares após a utilização de desmontes de ensaio. São aplicadas técnicas de regressão estatística no tratamento dos dados de campo, os quais fornecem, após aplicação dos métodos dos mínimos quadrados, os valores característicos da situação real em análise (Dinis da Gama, 1998).

Sabendo os valores das velocidades resultantes de partícula obtidos em cada desmonte, correlacionam-se com as distâncias entre o ponto de detonação e ponto de monitorização e as cargas detonadas por retardo (Dinis da Gama, 1998).

Na definição das constantes estabelecem-se correlações onde a que se apresenta com o melhor coeficiente de correlação, é escolhida como lei de propagação das vibrações característica daquele local e para a litologia em questão (Bernardo, 2004). Esta correlação matemática entre as três variáveis e é válida para cada tipo rochoso e para cada direcção do espaço.

Considerando estas três variáveis pode-se estabelecer leis de propagação específicas para cada tipo de rochas presentes no meio a desmontar, e estabelecê-las para cada direcção relevante no espaço.

Uma vez identificado o limite a respeitar, com base nesta metodologia que servirá com prevenção de danos, determina-se a lei de propagação das vibrações adequada ao próprio local da obra podendo extrapolar a carga máxima por retardo de acordo com a distância entre o ponto de detonação e a estrutura a proteger.

Todos os valores das constantes estimados deverão ser comparados com bibliografias existentes em relação ao local e/ou litologia para correcta avaliação.

Algumas vezes considera-se por razões de simplicidade que apenas a variável (a) varia com o tipo de rocha.

A título de exemplo, apresenta-se valores das constantes para diferentes maciços rochosos existentes após a realização de vários estudos em Portugal e no estrangeiro.

Estes valores podem ser considerados como orientação na previsão das velocidades de vibração a atingir e carga máximas por retardo.

Tabela 5 – Coeficientes (a, b e c) característicos de algumas litologias (Bernardo & Torres, 2005)

Maciço Rochoso	Fonte	a	b	c
Basalto	Dinis da Gama (1997)	2.000	0,7	-1,9
Calcário (tipo não especificado)	Dinis da Gama (1997)	580	0,6	-1,4
Calcário pisolítico	VISA Consultores (1999)	500	0,42	-1,22
Granito, Gnaise, Pegmatito	Holmberg (1982)	700	0,7	-1,5
Hematite	Dinis da Gama (1979)	380	0,73	-1,87
Xisto-grauvaque (Algarve)	Remísio (1994)	1.598	0,88	-2,06

A caracterização dinâmica do maciço, atingida através do cálculo destes coeficientes vai permitir a representação de curvas de isovalores de velocidade, muito úteis para prever as cargas máximas que podem ser usadas por retardo.

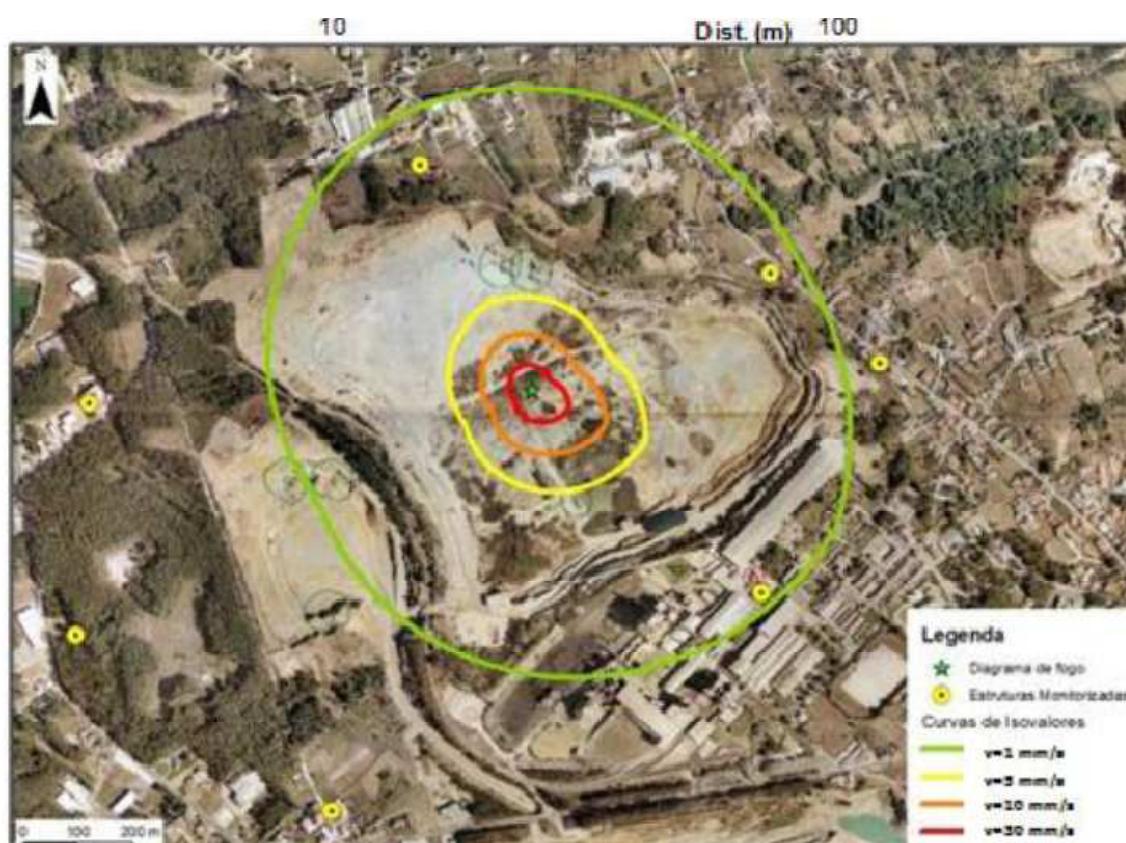


Figura 21 – Exemplo de curvas de isovalores de velocidade (Louro, 2009)

Outra metodologia para determinar o coeficiente de transmissão do maciço baseia-se no uso da fórmula de Langefors para determinar a velocidade de vibração directamente a partir da carga explosiva máxima e da distância ao ponto de detonação.

$$V = K \sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}} \quad (9.10)$$

Onde Q corresponde à carga máxima detonada por tempo, R à distância entre pontos de medição e detonação e K ao coeficiente de transmissão do terreno, que depende da homogeneidade da rocha e da presença de fracturas e falhas (Olofsson,1997).

A relação existente entre carga e distância pode ser utilizada para formar tabelas simples que poderão ser de bastante utilidade no planeamento dos desmontes (Olofsson,1997).

Estas tabelas que relacionam o valor da velocidade de vibração com a relação entre carga e distância, utilizam-se para determinar o coeficiente de transmissão do terreno (K). Este será determinado com pegadas experimentais com contínua e rigorosa monitorização sismográfica.

Este coeficiente vai depender directamente das características do terreno. Materiais soltos possuem baixo coeficiente de transmissão enquanto as rochas homogêneas apresentam os valores mais elevados. Este coeficiente também depende da fissuração existente no maciço e vai ser mais reduzido quanto maior o número de fissuras existentes (Olofsson, 1997).

Depois da determinação do coeficiente de transmissão, utilizando a fórmula de Langefors, pode-se traçar gráficos com a correcta previsão dos valores da velocidade de vibração a atingir (Olofsson, 1997).

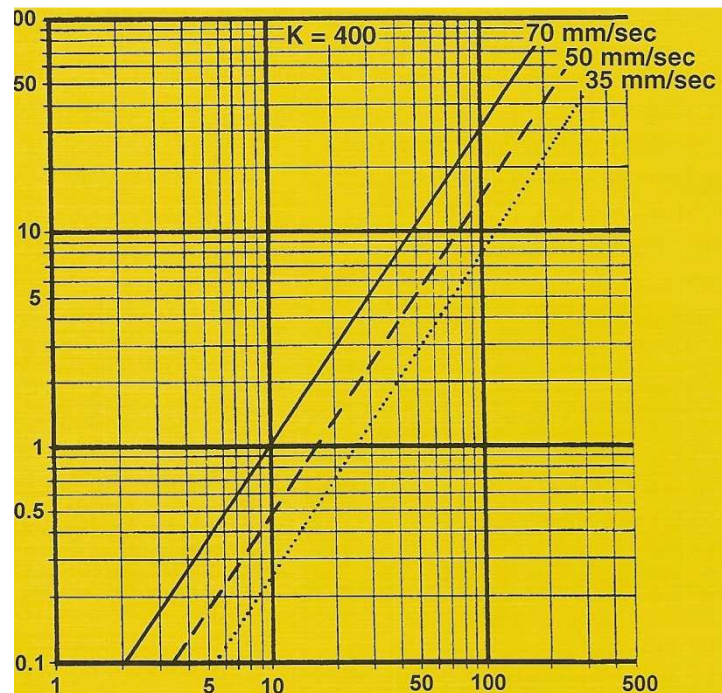


Figura 22 – Exemplos da relação carga distância para certos valores de vibração (Olofsson, 1997)

MONITORIZAÇÃO

10. Monitorização

É necessária a contínua monitorização dos níveis de vibrações atingidas no terreno uma vez que é comum o desconhecimento da caracterização dinâmica do terreno onde se desenvolve o projecto, logo não existe nenhuma lei descritiva da propagação de vibrações para aquele maciço específico, dificultando a antevisão dos efeitos causados pela escavação.

Os locais de implantação dos geofones deverão estar localizados na zona circundante à escavação, em estruturas sensíveis ou em zonas que poderão ser alvo de queixas de incomodidade.

Os parâmetros que se devem monitorizar são:

- Velocidade vibratória resultante da propagação ondulatória nas três componentes principais do espaço;
- Distância entre os pontos de detonação e monitorização;
- Carga de explosivo por retardo.

O aumento da distância entre o ponto de detonação e o ponto de monitorização origina uma maior área de maciço rochoso que a onda terá de atravessar, aumentando assim a probabilidade de ocorrência de superfícies de descontinuidade, heterogeneidades que provocam a redução dos valores das propriedades dinâmicas especialmente da frequência filtrada do terreno. Quanto maior esta distância maior a probabilidade de que a onda de vibração acesse estas ocorrências geológicas e vai-se alterar drasticamente.

Deve ser analisado o local de implantação dos geofones para estar isento de factores que poderão adulterar a aquisição real dos dados. Como por exemplo, a localização do geofone perto de uma estrada com movimento, este vai detectar igualmente as vibrações provenientes da circulação automóvel além das vibrações resultantes da detonação.

Por isso o ponto de monitorização deverá estar situado na estrutura que se pretende proteger e abrigado de recepção de vibrações oriundas de fontes externas à própria detonação.

O valor obtido deverá ser confrontado com a Norma Portuguesa em vigor e analisados os parâmetros do plano de fogo caso necessário.

Da correcta monitorização depreende a necessidade de alteração dos parâmetros de fogo e todo o desenrolar dos desmontes com explosivos de acordo com a Norma em vigor.

ENSAIOS DE CAMPO

11. Ensaio de Campo

A eleição de um local de ensaio deve conjugar os seguintes factores:

- Maciço com elevada resistência à escavação submetido à acção de explosivos;
- Profundidades de escavação que influenciem o meio circundante (aquíferos, etc.);
- Zona de relativa densidade populacional, ou rodeada de estruturas sensíveis;
- Inexistência de uma lei de atenuação de vibrações com os seus parâmetros bem definidos.

No planeamento inicial da etapa de desmonte com explosivos deve tomar-se atenção às características geológicas da rocha, se existem zonas fracas de fissuração elevada entre o local de desmonte e as estruturas a salvar. As vibrações podem alterar-se drasticamente com a passagem de meio heterogéneo para rocha mais homogénea.

As primeiras pegadas de fogo realizadas devem ser experimentais e as medições das vibrações devem ser utilizadas como guia de planeamento da optimização do desmonte a fogo na execução dessa obra. Estes resultados deverão ser constantemente utilizados como forma de atingir o patamar económico entre as etapas de perfuração e rebentamento. Deve contudo, deixar-se alguma margem de segurança em relação aos valores atingidos e coeficiente de atenuação calculado para precaver o aparecimento de algum factor que altere o nível de vibrações existentes previamente (Olofsson, 1997).

Sabendo a distância entre o ponto de detonação e a estrutura a proteger, pode assim facilmente determinar a carga correcta para não atingir os valores de vibração aceitáveis (Olofsson, 1997).

Segundo Dinis da Gama torna-se fundamental realizar no terreno as seguintes etapas de trabalho:

- Realização de um levantamento rigoroso da situação das construções localizadas na vizinhança do local a aplicar explosivos;
- Realização de ensaios de carga teste, monitorizando as vibrações que atingem as estruturas vizinhas a fim de determinar a lei de propagação da zona;
- Comparação entre os valores de velocidade de vibração atingidos com os admissíveis pela NP 2074;
- Elaboração do projecto de execução dos desmontes com explosivo;
- Programa de monitorização das vibrações e eleição das estruturas sensíveis a monitorizar;
- Optimização dos diagramas de fogo em função do resultado da monitorização e das condições operacionais da obra.

Na fase de ensaio deverão executar-se campanhas de aplicação de explosivo usando cargas graduais até atingir a carga máxima a aplicar no diagrama de fogo da correspondente escavação.

A determinação das propriedades dinâmicas dos maciços devido à recorrência dos registos de vibrações, servem para a caracterização do tipo de rocha presente e para a previsão dos mecanismos de propagação e atenuação das vibrações no terreno (Dinis da Gama, 1988 e 2003).

De forma sucinta deverá executar-se o seguinte plano de realização de ensaios:

1. Definição das estruturas a monitorizar;
2. Distribuição dos aparelhos pelas estações;
3. Definição dos parâmetros geométricos da pega;
4. Furação, carregamento e detonação;
5. Processamento de dados e confronto com a legislação;
6. Alterações aos parâmetros geométricos caso necessário.

A realização deste estudo dividiu-se em duas partes distintas. O ensaio de campo e o tratamento dos dados obtidos via informática.

Através dos dados obtidos no campo fez-se um tratamento estatístico para determinar os coeficientes a , b e c da fórmula de Johnson e o coeficiente K da fórmula de Langefors. Uma vez determinados estes valores fez-se uma previsão de velocidade de propagação de acordo com os parâmetros executados no plano de fogo.

No final e para o mesmo tipo de maciço, irá ficar definido qual das diferentes fórmulas mais se correlaciona ao resultado real dos dados nesse tipo de maciço.

Em cada desmorte foram rigorosamente medidos os parâmetros do diagrama de fogo.

A metodologia utilizada foi a seguinte demonstrada.

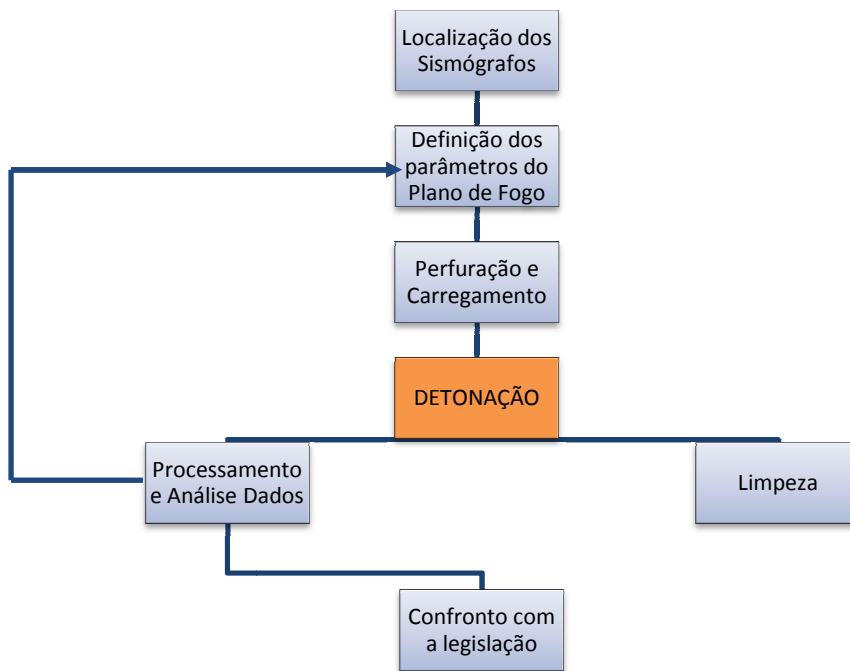


Figura 23 – Fluxograma da metodologia utilizada

Ao confrontar os valores com a NP 2074, se necessário, fizeram-se adaptações aos parâmetros geométricos do plano de fogo como a altura de bancada, diâmetro de perfuração e malha de perfuração.

Para o registo das velocidades de vibração foram utilizados vários sismógrafos:

- Vibracord VX;
- ABEM UVS 1500;
- Vibratech

Os explosivos utilizados na realização dos desmontes foram do tipo emulsões e ANFO. Os detonadores utilizados foram não eléctricos e a sequência de ligação dos mesmos respeitou sempre a não repetição de tempos, logo de cargas.

Especificações dos explosivos utilizados nos diferentes ensaios:

Tabela 6 – Especificações dos explosivos utilizados nos ensaios

Tipo Explosivo	ANFO	Emulsão	Emulsão Granel	Hidrogel
Densidade (g/cm ³)	0,85	1,2	1,15	1,25
Velocidade Detonação (m/s)	3000	5600	4200	5000
Energia Total (kJ/Kg)	1078	3600	3600	4400
Calibre utilizado (mm)	Granel	60; 70	Granel	60; 70
Comprimento Cartucho (m)	-	0,5	-	

11.1. Ensaios Maciço A

a) Localização

Este maciço localiza-se na zona da Serra da Moita em Arganil. Procedeu-se ao desmonte com explosivos para a execução da estrada IC6.



Figura 24 – Aspecto geral do maciço em ensaio A

b) Geologia

O maciço em estudo tem de morfologia complexo xisto grauvático com cristas quartzíticas. Os desmontes executaram-se completamente sobre esse relevos quartzitos. Estes terrenos são de natureza essencialmente rochosa dura com algumas intercalações xistosas.

Após a execução de ensaios sísmicos de refração estimou-se a sua velocidade de propagação sísmica de 4000 m / seg.

c) Estruturas a proteger

No ambiente circundante à área a desmontar existiam inúmeras habitações correntes a distâncias inferiores a 100 metros muitas das vezes.

Em cada desmorte foram colocados no mínimo três sismógrafos ao longo das estruturas a proteger.

Os parâmetros do plano de fogo foram correctamente anotados especialmente a carga explosiva por retardo, profundidade do furo e distância do ponto de detonação ao de monitorização.



Figura 25 – Zona envolvente à área de intervenção maciço A

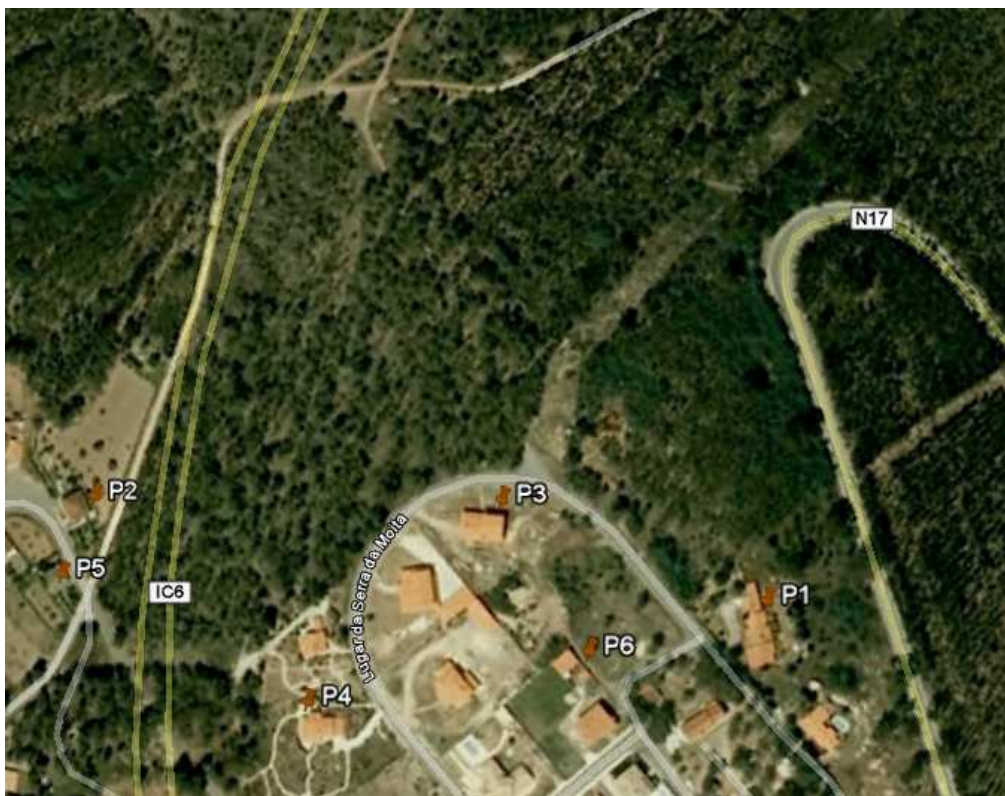


Figura 26 – Localização dos diferentes pontos de monitorização maciço A

d) Ensaios

Os desmontes executados apresentaram os seguintes parâmetros do diagrama de fogo base:

Tabela 7 – Parâmetros médios do plano de fogo maciço A

Variáveis	Valores		Unidades
PERFURAÇÃO			
Diâmetro de perfuração	89	76	mm
Comprimento do furo	10,50	4,00	m
Subfuração	1,00	1,00	m
Inclinação	10	10	graus
Afastamento	2,80	2,50	m
Espaçamento	3,30	2,50	m
Número de fiadas	3	3	n
CARGA			
Diâmetro cartucho	70	60	mm
Tipo carga fundo	Emulsão	Emulsão	
Carga de fundo	25	1,785	Kg
Tipo carga coluna	ANFO	Emulsão	
Carga de coluna	12,5	5,355	Kg

e) Resultados

Os valores obtidos com a utilização de o sismógrafo n.º 1 foram os seguintes:

Tabela 8 – Valores de velocidade de vibração obtidos maciço A

Data	Q (kg / tempo)	D (m)	v (mm/s)
10-Ago	48,4	335	2,45
28-Ago	43,2	326	1,75
08-Set	58,8	392	1,17
10-Set	61,2	326	2,35
15-Set	43,2	375	1,6
17-Set	38	380	1,5
22-Set	38	355	2,23
28-Set	45,8	225	2,34
01-Out	61,3	241	1,92
08-Out	38	229	3,89
12-Out	14,28	47	6,99
14-Out	48,4	102	5,78
15-Out	37,5	62	9,8
16-Out	7,14	52	4,6
19-Out	7,14	37	6,02

f) Fórmula de Johnson

Uma vez que temos presentes os valores relativos aos parâmetros v, Q e D, vai-se proceder à determinação das constantes a, b e c utilizando o método de regressão linear. A aplicação de um método numérico de regressão linear à lei de propagação das velocidades obriga à aplicação de logaritmos a todos os termos da equação de forma a transformar todos os expoentes em coeficientes (Bernardo & Vidal, 2005).

$$V = a Q^b D^c \leftrightarrow \log v = \log a + b \log Q + c \log D \quad (11.1)$$

Com esta equação obtém-se uma expressão equivalente onde se podem associar outras variáveis (Y, X₁ e X₂) que vão substituir as originais (v, Q e D).

$$Y = \log v \quad (11.2)$$

$$X_1 = \log Q \quad (11.3)$$

$$X_2 = \log D \quad (11.4)$$

Desta forma obtém-se mais uma nova equação na qual a variável Y, dependente, passa a ser função das variáveis X independentes. Estas últimas por apresentarem expoentes iguais à unidade permitem a aplicação da regressão linear múltipla (Bernardo & Vidal, 2005).

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \quad (11.5)$$

Estes novos coeficientes vão permitir o melhor ajustamento das variáveis X e Y.

Poderá haver a necessidade de extrair valores anómalos que facilmente se identificam num gráfico de correlação de regressão. Quando se determinar os valores dos coeficientes que maximizam a correlação deve-se transformar os coeficientes b_0 , b_1 e b_2 em a, b e c através das seguintes igualdades.

$$a = 10^{b_0} \quad (11.6)$$

$$b = b_1 \quad (11.7)$$

$$c = b_2 \quad (11.8)$$

Para realizar a regressão linear múltipla houve a necessidade de preparar os dados com a execução das equações descritas anteriormente.

Tabela 9 – Preparação dos dados para a análise de regressão linear no estudo maciço A

Preparação cálculo coeficientes					
SISMO 1					
V (mm/s)	Q (kg)	D (m)	Y	X1	X2
2,45	48,4	335	0,389	1,685	2,525
1,75	43,2	326	0,243	1,635	2,513
1,17	58,8	392	0,068	1,769	2,593
2,35	61,2	326	0,371	1,787	2,513
1,6	43,2	375	0,204	1,635	2,574
1,5	38	380	0,176	1,580	2,580
2,23	38	355	0,348	1,580	2,550
2,34	45,8	225	0,369	1,661	2,352
1,92	61,3	241	0,283	1,787	2,382
3,89	38	229	0,590	1,580	2,360
6,99	14,28	47	0,844	1,155	1,672
5,78	48,4	102	0,762	1,685	2,009
9,8	37,5	62	0,991	1,574	1,792
4,6	7,14	52	0,663	0,854	1,716
6,02	7,14	37	0,780	0,854	1,568

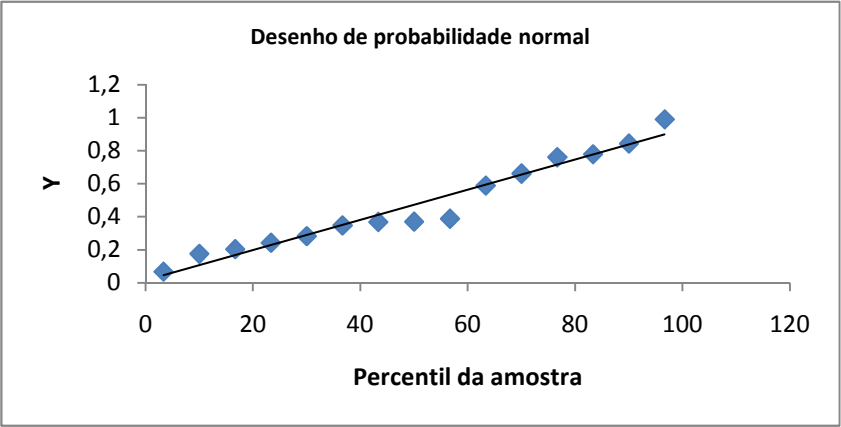
Existem diferentes programas para tratamento de dados e realização de regressões lineares múltiplas. Um deles é o programa MLINREG:BAS que analisa os dados e faz o seu tratamento estatístico de regressão linear múltipla utilizando a linguagem de programação BASIC. Com este programa determina-se as constantes a, b e c, utilizando a variável Y como sendo função das variáveis independentes X1 e X2.

No caso deste trabalho, utilizou-se o Excel 2007, onde inicialmente se adicionou e activou a funcionalidade análise de dados.

Após isto o programa permite a realização de vários teste estatísticos como a que se pretende, regressão linear múltipla com uma variável dependentes e duas independentes.

SUMÁRIO DOS RESULTADOS SISMO 1

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,929733114
Quadrado de R	0,864403664
Quadrado de R ajustado	0,841804275
Erro-padrão	0,111013116
Observações	15



ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>
Regressão	2	0,94275421	0,4713771	38,2489832	6,21567E-06
Residual	12	0,14788694	0,01232391		
Total	14	1,09064115			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interceptar	1,9190929	0,17774555	10,7968546	1,5547E-07	1,531818608	2,306367192	1,531818608	2,306367192
X1	0,393632097	0,15994604	2,46103066	0,02998186	0,045139623	0,742124571	0,045139623	0,742124571
X2	-0,91058662	0,13006851	-7,000823	1,4327E-05	-1,193981559	-0,627191682	-1,193981559	-0,627191682

Tabela 10 – Sumário dos resultados obtidos do cálculo da regressão múltipla linear e ANOVA do estudo do maciço A

Assim sendo após o tratamento estatístico e efectuando os cálculos acima descritos na preparação dos dados para os coeficientes obtidos por meio de regressão linear obtemos:

Tabela 11 – Valores das variáveis que compõem a equação de Johnson do maciço A

a = 10^{b₀}	83,00283
b = b₁	0,393632
c = b₂	-0,910586

Desta forma obtemos a seguinte lei genérica de propagação das velocidades de vibração para o maciço A:

$$v = 83,002 Q^{0,394} D^{-0,911} \quad (11.9)$$

g) Fórmula de Langefors

Esta fórmula como apresenta apenas uma constante (K) é fácil a sua determinação.

Uma vez que os valores de V, Q e D são conhecidos K calcula-se da seguinte forma:

$$V = K \sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}} \quad (11.10)$$

$$K = \frac{V}{\sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}}} \quad (11.11)$$

Após o cálculo obteve-se os diferentes valores da constante de transmissão das vibrações no terreno a qual se executou um média aritmética simples e obteve-se o valor de K médio. Pode-se verificar que grande parte dos valores de K obtidos são superiores à média.

Logo, para o efeito de cálculo das velocidades de vibração previstas utilizando a equação de Langefors, considerou-se 90% do valor máximo de K obtido. Desta forma, face ao nível de risco existente as velocidades previstas serão mais elevadas garantindo um maior coeficiente de segurança quando se utiliza as mesmas para dimensionamento das cargas.

Tabela 12 – Valores calculados de K para os diferentes registos de vibração obtidos no maciço A

SISMO 1			
V (mm/s)	Q (Kg)	R (m)	K
2,45	48,4	335	27,5757
1,75	43,2	326	20,4272
1,17	58,8	392	13,4419
2,35	61,2	326	23,0465
1,6	43,2	375	20,7444
1,5	38	380	20,9429
2,23	38	355	29,5859
2,34	45,8	225	20,0872
1,92	61,3	241	14,9997
3,89	38	229	37,1479
6,99	14,28	47	33,2037
5,78	48,4	102	26,6658
9,8	37,5	62	35,3593
4,6	7,14	52	33,3358
6,02	7,14	37	33,7986
MÉDIA			26,0242
90 % MÁX			33,4331

Logo desta forma a equação genérica de Langefors para este maciço em questão é:

$$V = 33,4331 \sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}} \quad (11.12)$$

h) Interpretação resultados

Com a utilização destas duas fórmulas como lei de propagação das velocidades de vibração, pode-se inferir qual o resultado previsto a nível de vibração a diferentes distâncias entre ponto de monitorização e ponto de detonação.

Utilizando as distâncias existentes nos ensaios efectuados neste tipo de maciço, compara-se a velocidade de vibração real obtida com as expectáveis utilizando as fórmulas genéricas supracitadas em relação à equação de Johnson e Langefors.

Estes valores de desvio entre a velocidade de vibração real e a expectável estão definidos na seguinte tabela.

Tabela 13 – Desvios obtidos velocidade de vibração expectável comparativamente com a real no maciço A

		Johnson	Langefors	V REAL	Desvio Johnson	Desvio Langefors
D (m)	Q (kg)	V (mm/s)	V (mm/s)	(mm/s)		
335	48,4	1,9169	2,9704	2,45	0,5331	0,5204
326	43,2	1,8790	2,8642	1,75	0,1290	1,1142
392	58,8	1,7937	2,9101	1,17	0,6237	1,7401
326	61,2	2,1554	3,4091	2,35	0,1946	1,0591
375	43,2	1,6540	2,5787	1,6	0,0540	0,9787
380	38	1,5536	2,3946	1,5	0,0536	0,8946
355	38	1,6530	2,5200	2,23	0,5770	0,2900
225	45,8	2,6955	3,8947	2,34	0,3555	1,5547
241	61,3	2,8401	4,2795	1,92	0,9201	2,3595
229	38	2,4644	3,5010	3,89	1,4256	0,3890
47	14,28	7,0920	7,0383	6,99	0,1020	0,0483
102	48,4	5,6635	7,2469	5,78	0,1165	1,4669
62	37,5	8,0610	9,2661	9,8	1,7390	0,5339
52	7,14	4,9223	4,6134	4,6	0,3223	0,0134
37	7,14	6,7114	5,9549	6,02	0,6914	0,0651
				média desvio	0,5225	0,8685

Colocando os valores obtidos reais com os expectáveis num gráfico consegue-se concluir qual das duas formulações realizadas, Johnson ou Langefors, provoca um menor desvio entre os valores obtidos realmente.

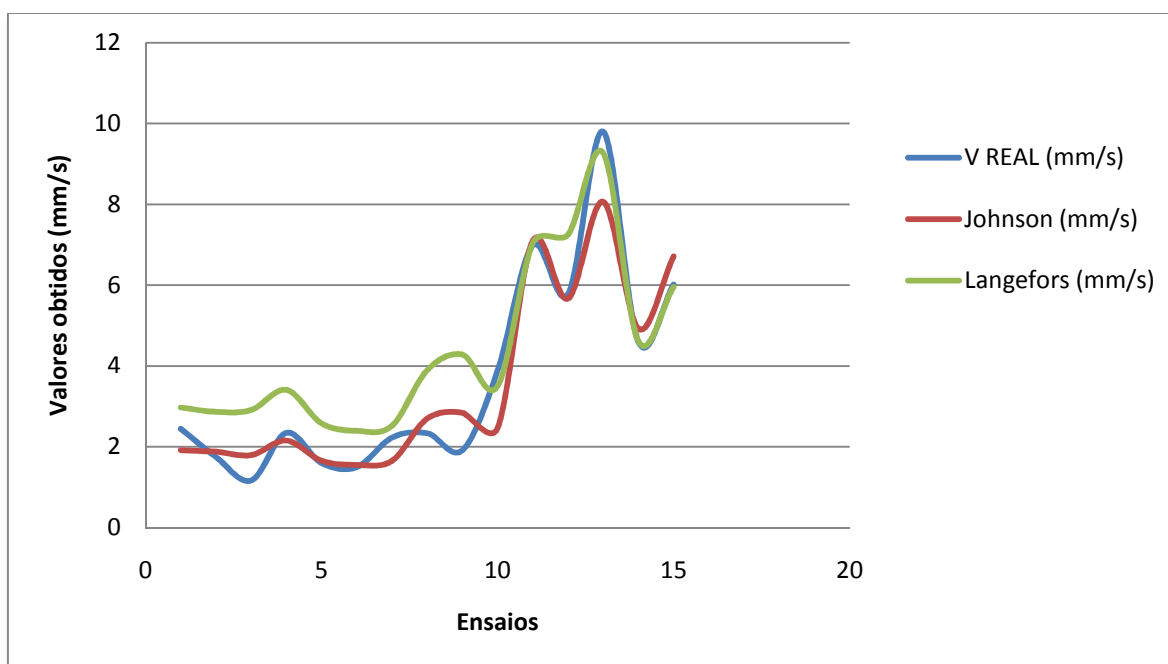


Figura 27 – Gráfico comparativo entre os valores de velocidade de vibração obtidos e os expectáveis

Numa análise preliminar e superficial observando o gráfico conclui-se que os valores calculados com a formulação da equação de Langefors provocam maiores desvios de valores em relação aqueles que foram obtidos nos ensaios. Este valor será da ordem média de 0,8685 mm/s de desvio em relação ao real.

Em relação à formulação da equação de Johnson, verifica-se que os valores calculados serão muito mais equilibrados e de menor desvio em relação aos reais. O desvio médio será de 0,5225 mm/s.

Como forma de melhor verificar esta relação efectuou-se as linhas de tendência de cada uma das dispersões.

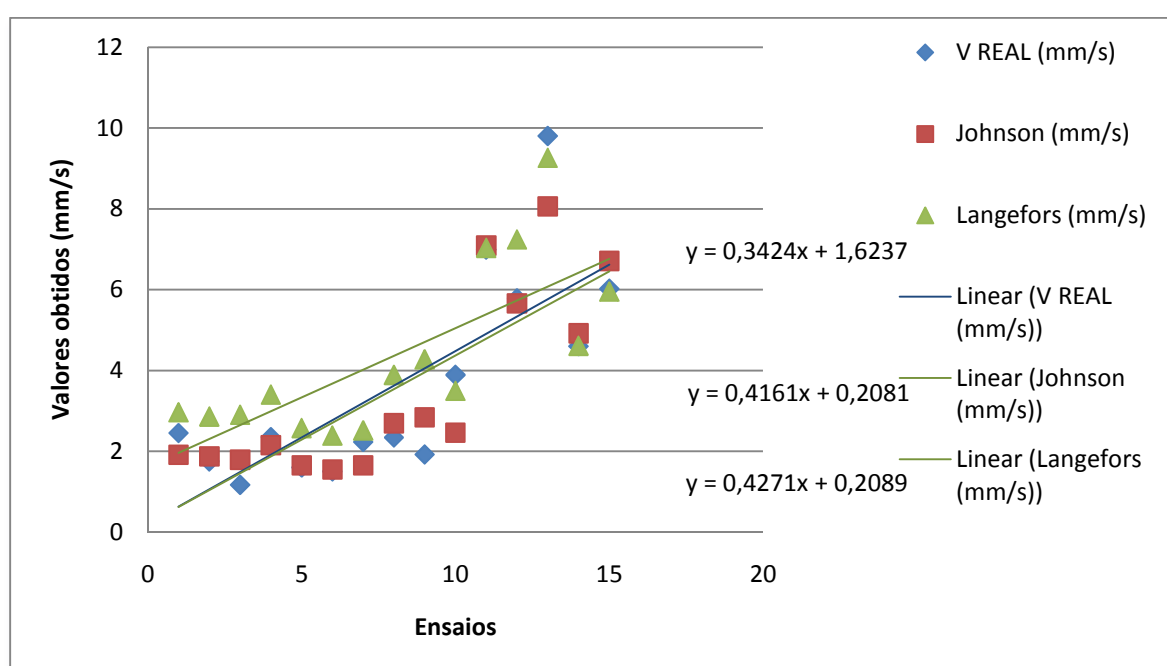


Figura 28 – Linhas de tendência em relação aos valores expectáveis e valores reais no maciço A

Como se verifica na figura supra, a linha de tendência da formulação da equação de Johnson será muito mais aproximada daquela criada para os valores reais, como se pode verificar igualmente nas equações lineares de cada linha de tendência. Assim sendo, a equação de Johnson formulada para este maciço será a mais aproximada a nível de previsão de valores do que a de Langefors, mesmo que esta última não apresente grandes desvios.

Para executar o trabalho com um maior coeficiente de segurança, a equação de Langefors parece ajustada uma vez que vai prever quase sempre valores maiores do que os realmente obtidos, o que dará uma boa margem de segurança com o que se calcula obter e o real obtido.

11.2. Ensaios Maciço B

a) Localização

Este maciço localiza-se na Serra do Outeiro e Penedice em Sta. Maria de Airão, freguesia de Gondomar, Distrito de Guimarães. Os desmontes com explosivos foram realizados na pedreira da Superinertes de Lopes & Filhos, S.A. para a produção de agregados.



Figura 29 – Aspecto geral do maciço em ensaio B

b) Geologia

A natureza geológica do maciço em estudo é fundamentalmente granítica com pequenos aloramentos de rochas xistentas. É um granito de tonalidade cinzento azulada, de duas micas com

grau médio a fino e tendência levemente porfiróide. É um tipo de rocha que faz parte do grupo de granitos calco-alcalinos tardi a post-tectónicos relativamente à terceira fase do orógeno hercínico.

c) Estruturas a proteger

No ambiente circundante à pedreira existem várias habitações correntes a uma distância média de cerca de 280 metros.

Foi colocado em cada desmorte um sismógrafo na estrutura mais próxima à zona onde se efectuou o disparo.

Os parâmetros do plano de fogo foram correctamente anotados especialmente a carga explosiva por retardo, profundidade do furo e distância do ponto de detonação ao de monitorização.



Figura 30 – Localização dos diferentes pontos de monitorização maciço B

d) Ensaios

Os desmontes executados apresentaram os seguintes parâmetros do diagrama de fogo base abaixo apresentado.

De salientar que todas as pegas desta observação foram carregadas com a utilização de uma unidade de bombeamento e sensibilização de explosivo in situ. Este explosivo emulsão a granel tem uma densidade final média de 1,15 g/cm³ e uma velocidade de detonação média superior a 4500 m/s.

Tabela 14 – Parâmetros médios do plano de fogo do maciço B

Variáveis	Valores	Unidades
PERFURAÇÃO		
Diâmetro de perfuração	76	Mm
Comprimento médio dos furos	12,50	M
Subfuração	1,00	M
Inclinação	10	Graus
Afastamento	3,00	M
Espaçamento	3,50	M
Número de fiadas	4	N
CARGA		
Diâmetro cartucho	70	Mm
Tipo carga fundo	Emulsão	
Carga de fundo	1,785	Kg
Tipo carga coluna	Granel	
Carga de coluna	53	Kg

e) Resultados

Os valores obtidos com a utilização de o sismógrafo n.º 1 foram os seguintes:

Tabela 15 – Valores de velocidade de vibração obtidos no maciço B

Data	Q (kg / tempo)	D (m)	v (mm/s)
10-Nov	55,65	415	4,87
25-Jun	53	555	2,27
04-Jun	53	150	8,82
01-Fev	53	392	1,95
07-Mai	63,5	425	1,96
24-Mai	63,6	304	3,15
10-Out	63,6	298	3,51
09-Fev	63,6	432	3,93
01-Fev	55,65	230	6,79
23-Jul	50,35	415	2,52
22-Mai	50,35	278	4,6
13-Out	60,95	378	2,11
31-Mar	55,65	410	2,04
14-Mar	50,35	457	2,09
20-Out	55,65	534	1,46

f) Fórmula de Johnson

Uma vez que temos presentes os valores relativos aos parâmetros v, Q e D, procedeu-se à determinação das constantes a, b e c utilizando o mesmo método de regressão linear que foi descrito no maciço A.

Para realizar a regressão linear múltipla houve a necessidade de preparar os dados à semelhança do que foi executado no maciço A, executando as equações anteriormente descritas.

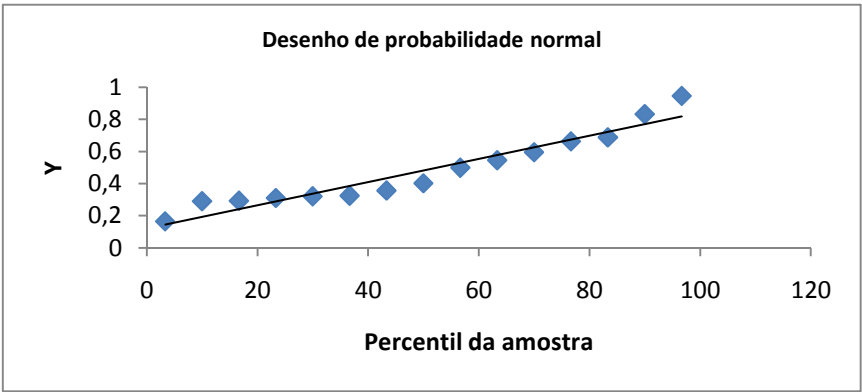
Tabela 16 – Preparação dos dados para a análise de regressão linear no estudo maciço B

Preparação cálculo coeficientes					
SISMO 1					
V (mm/s)	Q	D	Y	X1	X2
4,87	55,65	415	0,688	1,745	2,618
2,27	53	555	0,356	1,724	2,744
8,82	53	150	0,945	1,724	2,176
1,95	53	392	0,290	1,724	2,593
1,96	63,5	425	0,292	1,803	2,628
3,15	63,6	304	0,498	1,803	2,483
3,51	63,6	298	0,545	1,803	2,474
3,93	63,6	432	0,594	1,803	2,635
6,79	55,65	230	0,832	1,745	2,362
2,52	50,35	415	0,401	1,702	2,618
4,6	50,35	278	0,663	1,702	2,444
2,11	60,95	378	0,324	1,785	2,577
2,04	55,65	410	0,310	1,745	2,613
2,09	50,35	457	0,320	1,702	2,660
1,46	55,65	534	0,164	1,745	2,728

Aplicando a função de análise de dados presente no Excel e a opção regressão linear múltipla obtiveram-se os seguintes dados.

SUMÁRIO DOS RESULTADOS

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,824131193
Quadrado de R	0,679192224
Quadrado de R ajustado	0,625724261
Erro-padrão	0,137376813
Observações	15



ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>
Regressão	2	0,47946393	0,239731965	12,70278855	0,001090107
Residual	12	0,226468666	0,018872389		
Total	14	0,705932597			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interceptar	2,745844712	1,746443111	2,312559879	0,039293533	0,233581617	7,84392692	0,233581617	7,84392692
X1	0,312457756	0,93584557	-0,223140098	0,827179715	-2,247857003	1,830207659	-2,247857003	1,830207659
X2	-1,047208018	0,248123937	-5,030582843	0,000293889	-1,788823634	-0,707592402	-1,788823634	-0,707592402

Tabela 17 – Sumário dos resultados obtidos do cálculo da regressão múltipla linear e ANOVA do estudo maciço B

Assim sendo após o tratamento estatístico e efectuando os cálculos acima descritos na preparação dos dados para os coeficientes obtidos por meio de regressão linear obtemos:

Tabela 18 – Valores das variáveis que compõem a equação de Johnson do maciço B

a = 10^{b₀}	526,017266
b = b₁	0,312457756
c = b₂	-1,047208018

Desta forma obtemos a seguinte lei genérica de propagação das velocidades de vibração:

$$v = 526,02 Q^{0,312} D^{-1,047} \quad (11.13)$$

g) Fórmula de Langefors

Efectuou-se o mesmo tratamento específico que se realizou para o maciço A e após este obteve-se os diferentes valores da constante de transmissão das vibrações no terreno a qual se executou um média aritmética simples e obteve-se o valor de K médio. Pode-se verificar que grande parte dos valores de K obtidos são superiores à média.

Logo, para o efeito de cálculo das velocidades de vibração previstas utilizando a equação de Langefors, considerou-se 90% do valor máximo de K obtido. Desta forma, face ao nível de risco existente as velocidades previstas serão mais elevadas garantindo um maior coeficiente de segurança quando se utiliza as mesmas para dimensionamento das cargas.

Tabela 19 – Valores calculados de K para os diferentes registos de vibração obtidos no maciço B

LANGEFORS			
SISMOGRAFO 1			
V	Q	R	K
4,87	55,65	415	60,0250
2,27	53	555	35,6540
8,82	53	150	51,9277
1,95	53	392	23,5972
1,96	63,5	425	23,0229
3,15	63,6	304	28,7566
3,51	63,6	298	31,5675
3,93	63,6	432	46,6957
6,79	55,65	230	53,7568
2,52	50,35	415	32,6540
4,6	50,35	278	44,1359
2,11	60,95	378	23,1694
2,04	55,65	410	24,9164
2,09	50,35	457	29,1128
1,46	55,65	534	21,7408
MÉDIA			35,38218
90 % MÁX			54,02253

Logo desta forma a equação genérica de Langefors para este maciço em questão é:

$$V = 54,02253 \sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}} \quad (11.14)$$

h) Interpretação resultados

Com a utilização destas duas fórmulas como lei de propagação das velocidades de vibração, pode-se inferir qual o resultado previsto a nível de vibração a diferentes distâncias entre ponto de monitorização e ponto de detonação.

Utilizando as distâncias existentes nos ensaios efectuados neste tipo de maciço, compara-se a velocidade de vibração real obtida com as expectáveis utilizando as fórmulas genéricas supracitadas em relação à equação de Johnson e Langefors.

Estes valores de desvio entre a velocidade de vibração real e a expectável estão definidos na seguinte tabela.

Tabela 20 – Desvios obtidos velocidade de vibração expectável comparativamente com a real no maciço B

		Johnson (mm/s)	Langefors (mm/s)	V REAL (mm/s)	Desvio Johnson	Desvio Langefors
D (m)	Q (kg)	V (mm/s)	V (mm/s)			
415	55,65	3,3477	4,3830	4,87	1,5223	0,4870
555	53	2,4317	3,4395	2,27	0,1617	1,1695
150	53	9,5707	9,1758	8,82	0,7507	0,3558
392	53	3,4999	4,4642	1,95	1,5499	2,5142
425	63,5	3,4027	4,5991	1,96	1,4427	2,6391
304	63,6	4,8353	5,9176	3,15	1,6853	2,7676
298	63,6	4,9372	6,0068	3,51	1,4272	2,4968
432	63,6	3,3466	4,5466	3,93	0,5834	0,6166
230	55,65	6,2110	6,8236	6,79	0,5790	0,0336
415	50,35	3,2446	4,1691	2,52	0,7246	1,6491
278	50,35	4,9361	5,6304	4,6	0,3361	1,0304
378	60,95	3,7980	4,9197	2,11	1,6880	2,8097
410	55,65	3,3904	4,4230	2,04	1,3504	2,3830
457	50,35	2,9330	3,8783	2,09	0,8430	1,7883
534	55,65	2,5709	3,6279	1,46	1,1109	2,1679
média desvio					1,0503	1,6606

Colocando os valores obtidos reais com os expectáveis num gráfico consegue-se concluir qual das duas formulações realizadas, Johnson ou Langefors, provoca um menor desvio entre os valores obtidos realmente.

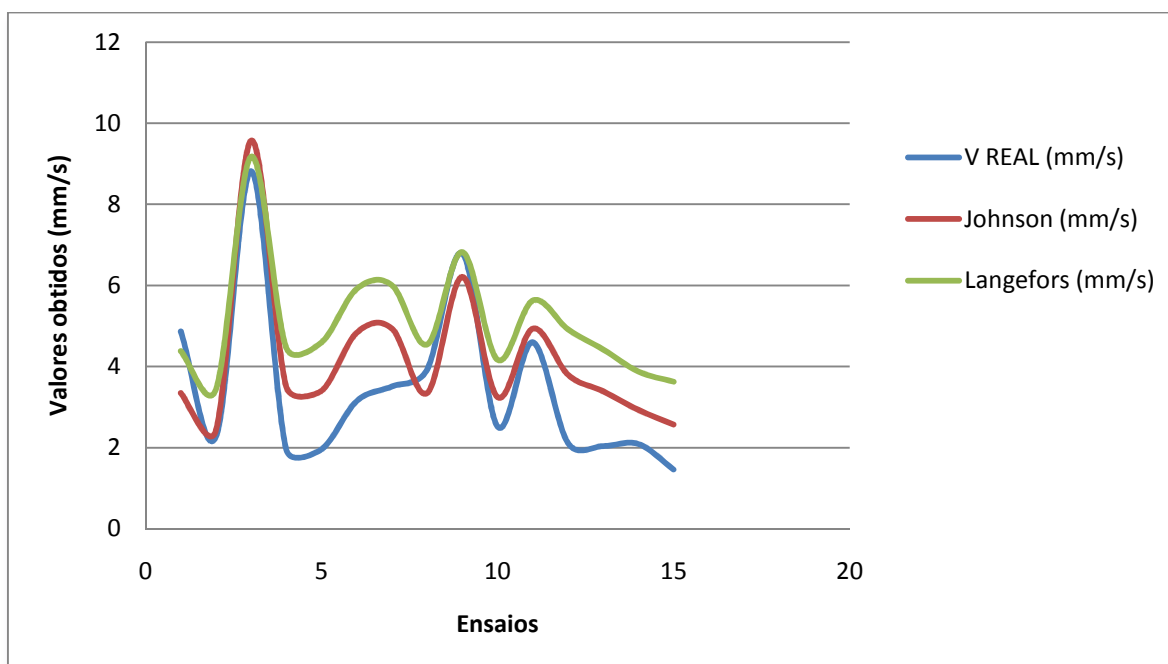


Figura 31 – Gráfico comparativo entre os valores de velocidade de vibração obtidos e os expectáveis

Numa primeira análise conclui-se que os valores calculados com a formulação da equação de Johnson andam sempre superiores aos valores obtidos realmente. Este valor será da ordem média de 1,0503 mm/s de desvio positivo em relação ao real.

Em relação à formulação da equação de Langefors, verifica-se que os valores calculados apresentam igualmente alguns desvios superiores aos reais. O desvio médio será de 1,6606 mm/s e o seu desvio será quase sempre superior à linha que define as velocidades reais obtidas.

A lei de propagação das velocidades formulada pela equação de Johnson apresenta menor desvio médio, logo será a previsão mais correcta dos valores reais. Salienta-se ainda que para a gama de vibrações mais elevada (8 a 10 mm/s) a lei formulada por Langefors apresentou um desvio negativo face à real, o que prejudica futuros cálculos a nível da segurança.

Neste caso e uma vez que se deve sempre trabalhar do lado da segurança a equação de Johnson será a de melhor utilização pois apresenta sempre um desvio superior do expectável com o real nomeadamente na gama de vibrações mais elevada e preocupante (8 a 10 mm/s).

Como forma de melhor verificar esta relação efectuou-se as linhas de tendência de cada uma das dispersões.

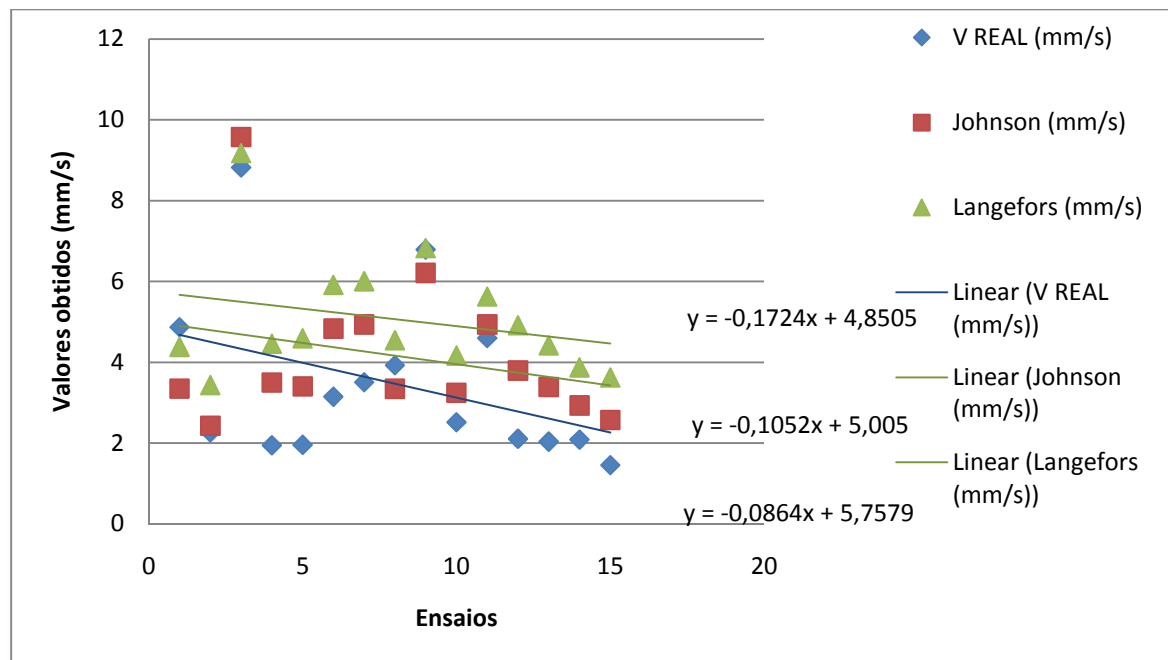


Figura 32 – Linhas de tendência em relação aos valores expectáveis e valores reais no maciço B

Como se verifica na figura supra, a linha de tendência da formulação da equação de Langefors e de Johnson são aproximadas e superiores à real, como se pode verificar igualmente nas equações lineares de cada linha de tendência, mas salienta-se o facto supracitado nas velocidades de vibração mais elevadas.

Logo a utilização da lei de propagação de vibrações formulada por Johnson apresenta ser uma boa aposta neste maciço para uma correcta decisão em base na segurança uma vez que os desvios atingidos por esta lei foram sempre muito elevados em relação à real vibração. Esta lei poderá ser útil em relação ao cálculo de valores expectáveis com maior segurança podendo servir o desvio apresentado como um acréscimo à margem de segurança dos valores calculados e reais.

11.3. Ensaios Maciço C

a) Localização

Este maciço localiza-se na Serra do Bouro em Caldas da Rainha, no afloramento da formação de Cabaços. Esta formação é composta por calcários argilo-detriticos, margas e arenitos.

Os desmontes com a utilização de explosivos foram realizados na pedreira da empresa Virgílio Cunha, S.A. para a produção de agregados.



Figura 33 – Aspecto geral do maciço em ensaio C

b) Geologia

A natureza geológica do maciço em estudo é fundamentalmente composta por calcários, margas e arenitos. A região de estudo integra-se no bordo ocidental da Bacia Lusitânica, na região das Caldas da Rainha, na parte norte do flanco oeste da estrutura diapírica. A Serra do Bouro (a NW das Caldas da Rainha e a N da Lagoa de Óbidos) é um relevo essencialmente constituído por formações carbonatadas, delimitado por falha a sul e sudeste; ao longo do limite tectónico, calcários do Jurássico Médio.

c) Estruturas a proteger

No ambiente circundante à pedreira existem várias habitações correntes a uma distância média de cerca de 250 metros.

Foi colocado em cada desmonte um sismógrafo na estrutura mais próxima à zona onde se efectuou o disparo.

Os parâmetros do plano de fogo foram correctamente anotados especialmente a carga explosiva por retardo, profundidade do furo e distância do ponto de detonação ao de monitorização.



Figura 34 – Localização dos diferentes pontos de monitorização maciço C

d) Ensaios

Os desmontes executados apresentaram os seguintes parâmetros do diagrama de fogo base abaixo apresentado.

Neste maciço específico, foram utilizados explosivos encartuchados tipo hidrogel e ANFO a granel.

Tabela 21 – Parâmetros médios do plano de fogo do maciço C

Variáveis	Valores	Unidades
PERFURAÇÃO		
Diâmetro de perfuração	89	mm
Comprimento médio dos furos	11,00	m
Subfuração	1,00	m
Inclinação	10	graus
Afastamento	4,00	m
Espaçamento	4,00	m
Número de fiadas	2	n
CARGA		
Diâmetro cartucho	80	mm
Tipo carga fundo	Hidrogel	
Carga de fundo	12,5	Kg
Tipo carga coluna	ANFO	
Carga de coluna	53	Kg

e) Resultados

Os valores obtidos com a utilização de o sismógrafo n.º 1 foram os seguintes:

Tabela 22 – Valores de velocidade de vibração obtidos no maciço C

Data	Q (kg / tempo)	D (m)	v (mm/s)
04-Mar	54,1	275	4,94
11-Mar	55	700	2,08
05-Fev	48,33	220	6,52
05-Fev	100	180	8,89
04-Mar	37,5	200	7,05
08-Jun	47	285	3,98
16-Jul	48,33	520	2,13
16-Jul	48,33	520	2,05
30-Out	42,5	300	3,06

f) Fórmula de Johnson

Uma vez que temos presentes os valores relativos aos parâmetros v , Q e D , procedeu-se à determinação das constantes a , b e c utilizando o mesmo método de regressão linear que foi descrito no maciço A.

Para realizar a regressão linear múltipla houve a necessidade de preparar os dados à semelhança do que foi executado no maciço A e B.

Tabela 23 – Preparação dos dados para a análise de regressão linear no estudo maciço C

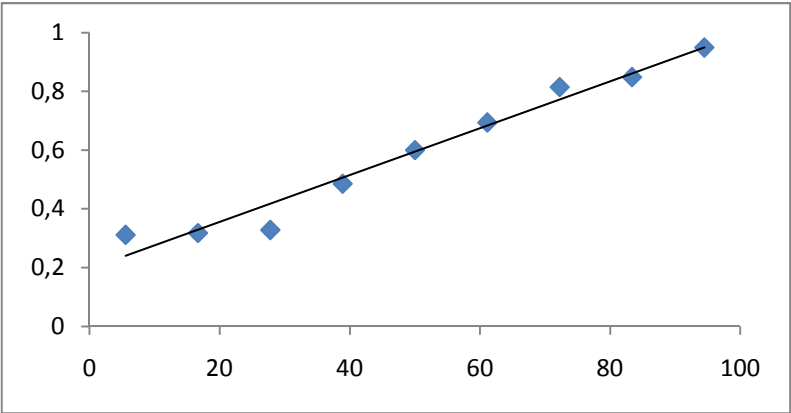
Preparação cálculo coeficientes					
SISMO 1					
V (mm/s)	Q	D	Y	X1	X2
4,94	54,1	275	0,694	1,733	2,439
2,08	55	700	0,318	1,740	2,845
6,52	48,33	220	0,814	1,684	2,342
8,89	100	180	0,949	2,000	2,255
7,05	37,5	200	0,848	1,574	2,301
3,98	47	285	0,600	1,672	2,455
2,13	48,33	520	0,328	1,684	2,716
2,05	48,33	520	0,312	1,684	2,716
3,06	42,5	300	0,486	1,628	2,477

Aplicando a função de análise de dados presente no Excel e a opção regressão linear múltipla obteve-se os seguintes dados.

De realçar que para o estudo deste maciço apenas se utilizou 9 registos de velocidade de vibração ao contrário dos 15 utilizados nos maciços anteriores.

SUMÁRIO DOS RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,965820652
Quadrado de R	0,932809531
Quadrado de R ajustado	0,910412708
Erro-padrão	0,073859127
Observações	9



ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significância</i>
Regressão	2	0,454406879	0,227203439	41,64918992	0,000303335
Residual	6	0,032731024	0,005455171		
Total	8	0,487137903			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro-padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor P</i>	<i>95% inferior</i>	<i>95% superior</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Interceptar	2,794384903	0,545517173	5,122450839	0,00217301	1,459552469	4,129217337	1,459552469	4,129217337
X1	0,325106454	0,222872568	1,458710045	0,194925178	-0,220243073	0,870455981	-0,220243073	0,870455981
X2	-1,100249788	0,128612256	-8,554781784	0,000140001	-1,414952642	-0,785546935	-1,414952642	-0,785546935

Tabela 24 – Sumário dos resultados obtidos do cálculo da regressão múltipla linear e ANOVA do estudo maciço C

Assim sendo após o tratamento estatístico e efectuando os cálculos acima descritos na preparação dos dados para os coeficientes obtidos por meio de regressão linear obtemos:

Tabela 25 – Valores das variáveis que compõem a equação de Johnson do maciço C

a = 10^{b₀}	622,300285
b = b₁	0,325106
c = b₂	-1,100249

Desta forma obtemos a seguinte lei genérica de propagação das velocidades de vibração:

$$v = 622,30Q^{0,325}D^{-1,10} \quad (11.15)$$

g) Fórmula de Langefors

Efectuou-se o mesmo tratamento específico que se realizou para o maciço A e após este obteve-se os diferentes valores da constante de transmissão das vibrações no terreno a qual se executou um média aritmética simples e obteve-se o valor de K estimado. Pode-se verificar que grande parte dos valores de K obtidos são superiores à média.

Logo, para o efeito de cálculo das velocidades de vibração previstas utilizando a equação de Langefors, considerou-se 90% do valor máximo de K obtido. Desta forma, face ao nível de risco existente as velocidades previstas serão mais elevadas garantindo um maior coeficiente de segurança quando se utiliza as mesmas para dimensionamento das cargas.

Tabela 26 – Valores calculados de K para os diferentes registos de vibração obtidos no maciço C

LANGEFORS			
SISMOGRAFO 1			
v	Q	R	K
4,94	54,1	275	45,3553
2,08	55	700	38,1685
6,52	48,33	220	53,5743
8,89	100	180	43,6874
7,05	37,5	200	61,2274
3,98	47	285	40,2687
2,13	48,33	520	33,3637
2,05	48,33	520	32,3419
3,06	42,5	300	33,8351
MÉDIA			42,4247
90 % MÁX			55,1046

Logo desta forma a equação genérica de Langefors para este maciço em questão é:

$$V = 55,1046 \sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}} \quad (11.16)$$

h) Interpretação resultados

Com a utilização destas duas fórmulas como lei de propagação das velocidades de vibração, pode-se inferir qual o resultado previsto a nível de vibração a diferentes distâncias entre ponto de monitorização e ponto de detonação.

Utilizando as distâncias existentes nos ensaios efectuados neste tipo de maciço, compara-se a velocidade de vibração real obtida com as expectáveis utilizando as fórmulas genéricas supracitadas em relação à equação de Johnson e Langefors.

Estes valores de desvio entre a velocidade de vibração real e a expectável estão definidos na seguinte tabela.

Tabela 27 – Desvios obtidos da velocidade de vibração expectável comparativamente com a real no maciço

C

		Johnson (mm/s)	Langefors (mm/s)	V REAL (mm/s)	Desvio Johnson	Desvio Langefors
D (m)	Q (kg)	V (mm/s)	V (mm/s)			
275	54,1	4,7156	6,0019	4,94	0,2244	1,0619
700	55	1,6961	3,0029	2,08	0,3839	0,9229
220	48,33	5,8108	6,7063	6,52	0,7092	0,1863
180	100	9,1780	11,2133	8,89	0,2880	2,3233
200	37,5	5,9425	6,3450	7,05	1,1075	0,7050
285	47	4,3312	5,4463	3,98	0,3512	1,4663
520	48,33	2,2554	3,5180	2,13	0,1254	1,3880
520	48,33	2,2318	3,4928	2,05	0,1818	1,4428
300	42,5	3,9618	4,9836	3,06	0,9018	1,9236
média desvio					0,4748	1,2689

Colocando os valores obtidos reais com os expectáveis num gráfico consegue-se concluir qual das duas formulações realizadas, Johnson ou Langefors, provoca um menor desvio entre os valores obtidos realmente.

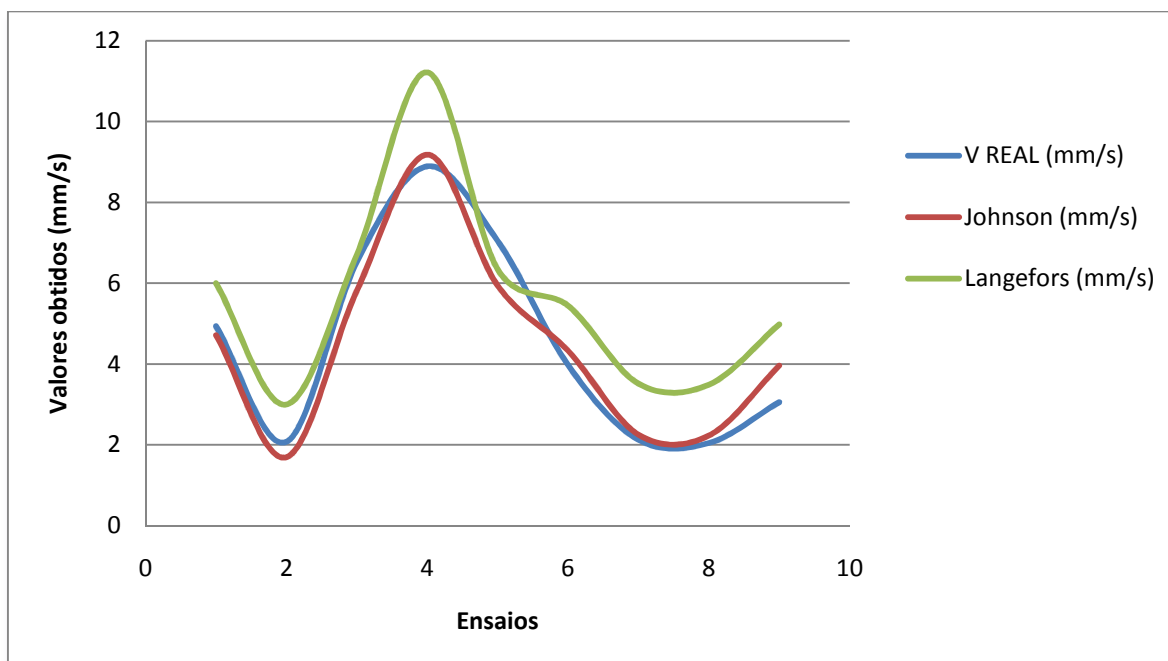


Figura 35 – Gráfico comparativo entre os valores de velocidade de vibração obtidos e os expectáveis no maciço C

Numa primeira análise conclui-se que os valores calculados com a formulação da equação de Johnson andam muito semelhantes aos valores obtidos realmente. Os valores médios de desvio andam nos 0,4748 mm/s de desvio em relação ao real. Estes desvios são negativos e positivos em relação à real.

Em relação à formulação da equação de Langefors, verifica-se que os valores calculados apresentam desvios quase sempre superiores aos valores reais. O desvio médio será de 1,2689 mm/s.

A lei de formulada por Langefors deverá ser a utilizada em trabalhos futuros neste maciço onde se pretende inferir a velocidade de vibração a atingir, uma vez que apresenta maiores desvios para gamas de velocidades de vibração maiores ($v > 8$ mm/s). A utilização da equação formulada por Johnson apresenta valores de previsão muito semelhantes com os reais obtidos, podendo ser utilizada para gamas de vibrações mais baixas e para zonas onde o coeficiente de risco seja reduzido.

Como forma de melhor verificar esta relação efectuou-se as linhas de tendência de cada uma das dispersões.

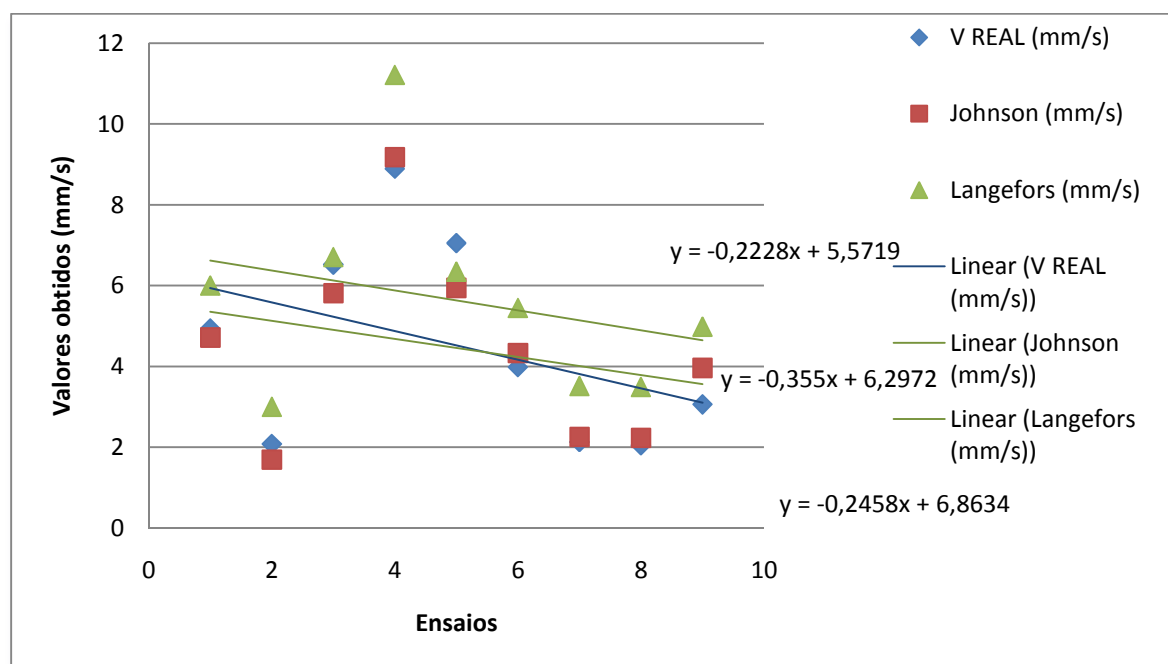


Figura 36 – Linhas de tendência em relação aos valores expectáveis e valores reais no maciço C

Como se verifica na figura supra, as linhas de tendência da formulação de Johnson será muito aproximada daquela criada para os valores reais, como se pode verificar igualmente nas equações lineares de cada linha de tendência.

A formulação através de Langefors apesar de ser ligeiramente aproximada tende para valores de vibração previstos mais elevados do que os atingidos. Sendo assim a formulação criada por esta fórmula apresenta ser uma boa aposta neste maciço para uma correcta decisão em base na segurança uma vez que as velocidades de vibração previstas, são superiores às reais especialmente a um nível de vibrações mais elevado.

11.4. Resumo dos valores calculados

Os valores calculados nos três diferentes tipos de maciço foram os seguintes:

Tabela 28 – Valores das constantes adimensionais por maciço

		Maciço A	Maciço B	Maciço C
Johnson	a	88,002	526,017	622,300
	b	0,394	0,312	0,325
	c	-0,911	-1,047	-1,100
Langefors	K médio	26,024	35,382	42,425
	K segurança	33,433	54,023	55,105

Equação que melhor se adequa às condições do maciço A:

$$v = 83,002 Q^{0,394} D^{-0,911} \quad (11.17)$$

Equação que melhor se adequa às condições do maciço B:

$$V = 54,023 \sqrt{\frac{Q}{R^{3/2}}} \quad (11.16)$$

Equação que melhor se adequa às condições do maciço C:

$$v = 622,3 Q^{0,325} D^{-1,1} \quad (11.19)$$

PARÂMETRO FREQUÊNCIA

12. Parâmetro frequência

A frequência da vibração é um parâmetro que condiciona a magnitude dos impactes gerados pela detonação de explosivos em termos de sensibilidade humana e resposta do maciço.

A nível internacional, este é um parâmetro primordial na discussão dos critérios de dano e devem ser pormenorizadamente discutidos antes, durante e após os trabalhos (Bernardo, 2004).

Cada maciço rochoso tem características próprias de resposta à passagem de ondas de tensão, que estão dependentes das propriedades do mesmo.

Pensa-se que os maciços originam um efeito de filtro na passagem das ondas, de modo a só vibrarem para uma determinada gama de frequências chamadas como frequência dominante.

Na legislação vigente em outros países ressalta a importância da avaliação deste parâmetro como prevenção dos danos nas estruturas.

A frequência é considerada como essencial na avaliação do comportamento dinâmico da estrutura especialmente se a frequência dominante da onda de passagem for semelhante à frequência natural da estrutura. (Svinkin et al., 2003). Nesta situação de igualdade de frequências amplia-se a intensidade da vibração, provocando o aparecimento de danos.

O mesmo autor refere que a frequência é um parâmetro essencial no planeamento dos planos de fogo especialmente se a frequência dominante da perturbação ondulatória for próxima da frequência natural da estrutura a proteger.

As frequências dominantes num tipo de solo menos competente e homogéneo tipo areia, argila são muito menores que as verificadas em rochas tipo granito (Olofsson, 1997).

As frequências mais baixas ocorrem em rochas moles e quando a detonação se proporciona a longas distâncias do ponto de monitorização. Nas frequências mais baixas poderá teoricamente existir sobreposição de ondas entre diferentes períodos de retardo de detonação (Olofsson, 1997).

Uma vez caracterizada a importância da frequência na propagação de velocidades de vibração, uma vez que está directamente relacionada com a escala de dano que poderá existir sobre a estrutura, foram propostas melhorias à norma portuguesa com a inclusão desse parâmetro.

CONCLUSÕES

13. Conclusões

Os impactes ambientais oriundos do uso de explosivos são explicáveis, mensuráveis e controláveis. Consegue-se, de certa forma aproximada, calcular o impacto ambiental proveniente das velocidades de vibração do maciço.

A realização de ensaios prévios de desmontes com cargas controladas consegue ser um método seguro para a detecção das características do maciço, nomeadamente da sua lei de propagação de velocidades. Com estes ensaios e após a realização de trabalho estatístico conseguem-se obter as constantes que formarão a lei de propagação de velocidades.

Qualquer obra de desmonte com explosivos que apresente na sua área circundante estruturas a proteger, deverá de forma segura avaliar-se a propagação das ondas vibratórias no maciço. Esta avaliação só se consegue realizar após a execução de ensaios com cargas teste que servirão de referência para a escolha de todos os parâmetros dos restantes desmontes gerais.

Como se demonstrou neste estudo, as velocidades de vibração obtidas em ensaio não apresentaram grandes desvios relativamente aqueles que foram calculadas como previstas. A correlação obtida usando a equação que apresenta três variáveis em vez da equação que apresenta somente uma variável, foi mais similar com a realidade.

Contudo após a aplicação de um nível de risco na utilização da equação de Langefors de 90 % do valor máximo de coeficiente K calculado pelos ensaios realizados, estimou-se ser uma boa aposta no que diz respeito à segurança pois apresentou valores de K previstos quase sempre superiores aos reais obtidos.

Conclui-se que a lei de propagação de velocidades correspondente a Johnson apresenta-se como a escolha mais aproximada para a realização de projectos recorrendo a explosivos. A utilização desta lei na obtenção das constantes variáveis e formulação da velocidade de propagação específica de um tipo de maciço deverá ser um exercício recorrente para cada zona ou maciço diferente que se vai movimentar.

Como escolha mais segura, pelo menos no caso destes três maciços, a lei de propagação de velocidades correspondente a Langefors apresenta-se ser a melhor escolha, especialmente com a aplicação do nível de risco, que condiciona o cálculo a partir de 90 % do valor máximo de K obtido, contribuindo para a obtenção de valores expectáveis superiores aos reais logo levando ao dimensionamento da carga explosiva pelo lado da prevenção de risco e segurança.

Esta fórmula é de fácil utilização sem recorrer ao uso de tratamento estatísticos como a de Johnson, significa que será uma ferramenta imediata de fácil utilização e bastante caracterizadora da prevenção a obter. A utilização desta lei para quase directamente definir a quantidade de carga a utilizar com uma ao margem de segurança nos valores a obter deve ser um exercício corrente em qualquer zona a desmontar onde se desconheça o valor do coeficiente de transmissão do terreno.

A articulação de ambas as leis, a de Johnson para uma mais correcta aproximação do valor real e a de Langefors para contribuir para um correcto dimensionamento dos parâmetros do plano de fogo pelo lado da segurança, poderá ser um instrumento de comprovação dos desvios obtidos entre segurança, previsão e realidade podendo contribuir para a estipulação de diferentes coeficientes de segurança para cada tipo de maciço.

Uma vez que existe este método simples de definir, mesmo que seja de forma aproximada, uma lei de propagação das vibrações resultantes do uso de explosivo conclui-se que quando o limite imposto é ultrapassado é provável que a operação de desmonte tenha sido mal dimensionada ou executada, ou então não se realizaram ensaios nenhuns e partiu-se para a execução de um desmonte de produção normal sem conhecer a sua característica de propagação de velocidades.

A minimização dos impactes ambientais é compatível com a minimização dos custos nos desmontes, uma vez que sabendo os valores limite a atingir, a abordagem pelo método de desmonte a utilizar será melhor, evitando muitas vezes sobre custos em fragmentações secundárias ou granulometrias não desejadas.

Este trabalho consistiu na reunião e análise de vários registos de monitorização que se efectuaram em vários desmontes em zonas distintas, nomeadamente três zonas litológicas e geologicamente diferentes: quartzito, granito e calcário.

Este tema apresenta um rol de parâmetros a equacionar em futuros estudos, nomeadamente as características dos maciços e sua interferência na velocidade de propagação das vibrações.

Como proposta para trabalhos futuros seria interessante as seguintes temáticas:

- Obtenção do valor das variáveis que compõem a equação de Johnson e Langefors para cada tipo de maciço geológico existente em Portugal criando uma base de dados que serviria de base de orientação no estudo, orçamentação e realização de ensaios de obras de movimentação de maciço recorrendo a explosivos;

- Obtenção de cartas de isovalores de velocidade referentes a cada zona a intervir por método de desmonte por explosivos;
- Comparação entre estas duas leis de propagação de velocidade a mais outras como por exemplo a de Chapot;
- A ilustração de um trabalho com dados reais sobre as frequências atingidas e a sua alteração como base de uma delineação da necessidade de revisão da Norma Portuguesa.

Esta última proposta surge na necessidade, uma vez que existem várias situações de risco na presença de gamas de frequências mais baixas, de um estudo que englobaria a análise da frequência separadamente da velocidade de vibração e sua interferência no comportamento das estruturas para servir de apoio às diferentes propostas que existem para melhoria da Norma em vigor para estes casos.

Referências bibliográficas

- Azevedo, F. S. & Patrício, J., 2003. Critérios de Danos e de Incomodidade no Domínio das Vibrações Ambientais. *Ingenium*, Revista da Ordem dos Engenheiros, II série, nº 72, Janeiro de 2003, pp 85-88.
- Azimi Y., Khoshrou S.H., Osanloo M. & Sadeghee A.S., 2010. Seismic wave monitoring and ground vibration analysis for bench blasting in Sungun open pit copper mine. *Rock fragmentation by blasting* Sanchidrián ed.
- Bernardo, P. A. M., 2004. Impactes Ambientais do Uso de Explosivos na Escavação de Rochas, com Ênfase nas Vibrações. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Minas. I.S.T. - U.T.L.
- Bernardo, P. A. M. & Dinis da Gama, C., 2005. Sobre a Necessidade de Actualização da Norma Portuguesa 2074. XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros. Ponta Delgada; pp. 19-28.
- Bernardo, P. A. M. & Torres, Vidal N., 2005. Metodologia para a Prevenção de Danos e Controle Ambiental de Vibrações Causadas por Detonações em Maciços Rochosos. XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros. Ponta Delgada; pp. 29-42.
- Bernardo, P. A. M. & Dinis da Gama, C., 2005. Sugestões para a melhoria da Norma Portuguesa de controle de vibrações em construções. X Congresso Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa.
- Bernardo, P. A. M., 2010. Escavação de Maciços Rochosos com Explosivos. VII Curso Sobre Explosivos para Responsáveis Técnicos de Pedreiras e Obras de Escavação. Organizado pelo CEGEO (Centro de Geotecnia do I. S. T.), na Universidade de Aveiro, em Fevereiro de 2010.
- Bernardo, P. A. M., 2010. Abordagem quantitativa dos impactes ambientais de desmontes – projecções e vibrações. VII Curso Sobre Explosivos para Responsáveis Técnicos de Pedreiras e Obras de Escavação. Organizado pelo CEGEO (Centro de Geotecnia do I. S. T.), na Universidade de Aveiro, em Fevereiro de 2010.
- Bhandari, S., 1997. *Engineering Rock Blasting Operations*. Balkema Publisher. Rotterdam, Netherlands. 371 pp.
- Campos e Matos, A., 2000. Apontamentos da disciplina de Mecânica das Rochas do curso de Engenharia Civil na F.E.U.P.

- Decreto Lei nº 162/90, de 22 de Maio 1990. Estabelece o regulamento geral de segurança e higiene no trabalho nas minas e pedreiras. Emissor: Ministério da Indústria e Energia. Imprensa Nacional Casa da Moeda, Lisboa.
- Decreto Lei nº 69/2000, de 3 de Maio 2000. Estabelece o regime jurídico da avaliação de impacte ambiental dos projectos públicos e privados susceptíveis de produzirem efeitos significativos no ambiente. Emissor: Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território. Imprensa Nacional Casa da Moeda, Lisboa.
- Dinis da Gama, C. & Jimeno, C. L., 1993. Rock Fragmentation Control for Blasting Cost Optimization and Environmental Impact Abatement. 4th International Symposium of Rock Fragmentation by Blasting. A. A. Balkema. Rotterdam, Viena.
- Dinis da Gama, C., 1998. Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos. Comunicações do 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas. Divisão de Minas e Pedreiras do IGM.
- Dinis da Gama, C. & Simone, L., 2003. Análise dos riscos inerentes às vibrações transmitidas às estruturas.
- Dinis da Gama, C., 2004. Uma solução analítica para a propagação de ondas em barras cónicas aplicável à medição da resistência à tracção dinâmica de materiais sólidos. Revista Geotecnia nº 100, publicada pela Sociedade Portuguesa de Geotecnia.
- Dinis da Gama, C. & Paneiro, G., 2004. Quantificação do descritor vibrações em estudos de impacte ambiental. IX Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro Ed. SPG, Vol. II, pp. 297-306.
- Dinis da Gama, C. & Paneiro, G., 2006. A Incomodidade Humana perante as Vibrações e sua Caracterização Absoluta e Relativa.
- Dinis da Gama, C., 2008 – Vibrações na atmosfera e nos terrenos adjacentes pós detonação de explosivos – Quantificação da sua afectação ambiental. V Congresso Ibérico de Acústica, Comibra.
- Dinis da Gama, C., 2010. Dinâmica das Rochas (Comportamento dinâmico de maciços rochosos, propagação de ondas, reflexão e refacção, mecanismos de rotura das rochas sob a acção de detonações, fragmentação e fragmentabilidade). VII Curso Sobre Explosivos para Responsáveis Técnicos de Pedreiras e Obras de Escavação. Organizado pelo CEGEO (Centro de Geotecnia do I. S. T.), na Universidade de Aveiro, em Fevereiro de 2010.
- Galiza, A. C. Gomes, L. & Vieira, A., 2003. Sebenta de desmonte com explosivos I, I.S.E.P.
- Galiza, A. C. Gomes, L. & Vieira, A., 2003. Sebenta de desmonte com explosivos II, I.S.E.P.
- Gustafsson, R., 1973. Swedish Blasting Technique. SPI Publisher, Gyttrorp Sweden. 321 pp.

- Jimeno, E. L., Jimeno, C. L. & Bermudez, P. G., 2003. Manual de Perforación y Voladura de Rocas. ITGE. 2ª Edição. Espanha.
- Langefors, U. & Kihlstrom, B., 1963. The Modern Techniques of Rock Blasting. John Wiley & Sons Inc., Nova Iorque. E. U. A.
- Lopez Jimeno, C., 2000. Manual de túneles y obras subterráneas. 3ª Edição. Entorno Gráfico editorial. Espanha. 1080 pp.
- Louro, A., 2009. Novas formulações para leis de propagação de vibrações, em maciços rochosos, baseadas nas propriedades termodinâmicas dos explosivos. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Minas. I.S.T- U.T.L.
- Navarro Torres, V., 2004. Prediction of the DTW (Damaged to Tunnel Wall) in Tunnels Excavation with Explosive, Based on the Speed Waves P of Propagation in Rock Mass. IX Congresso Nacional de Geotecnia. Aveiro, pp. 277-284.
- Navarro Torres, V., Dinis da Gama, C. & Barroso, F., 2005. Ruído e vibrações inerentes ao avanço de uma obra geotécnica urbana – Cais de Sodré. X Congresso Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa.
- Norma Portuguesa NP 2074, 1983. Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa.
- Olofsson, S.O., 1997. Applied Explosives Technology For Construction and Mining. Applex AB publisher, Arla Sweden. 342 pp.
- Pascual de Blas, J.A., 2007. Problemática de las vibraciones en las voladuras. Medición, Control y Regulación Legal. Módulo de Curso Académico 2006-2007 ETSI de Minas.
- Persson, P., Holmberg, R. & Lee, J., 1994. Rock Blasting and Explosives Engineering. CRC Press publisher. USA. 533 pp.
- Rodrigues, H., 2008. Desmorte de rocha com explosivos: principais parâmetros na optimização do desmorte condicionado (caso prático – bacia de retenção e tratamento da A28/IC1 – Ligação a Caminha. Projecto para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente. I.S.E.P.
- Sarsby, R., 2000. Environmental Geotechnics. Thomas Telford, London. United Kingdom.
- Schiappa de Azevedo, F. & Patrício, J., 2001. Vibrações Ambientais. Critérios de danos e de incomodidade. Actualidade e perspectivas futuras. Tecniacústica 2001
- Vorobev, V. D., Kuzemko A. A., Denisjuk, I. I. & Dauetas, A. A., 1993. Seismic effects of blasting in rock. Russian translator series 103. Balkema, Rotterdam, Holand. 230 pp.